



# СТРУЙНАЯ ПЕЧАТЬ В ПРОИЗВОДСТВЕ ЭЛЕКТРОНИКИ

М.Гольцова

Струйная печать благодаря своему цифровому характеру и отсутствию средств механической обработки представляет большой интерес для изготовителей изделий электроники. Для технологии струйной печати электронных устройств разрабатываются разнообразные активные и пассивные материалы, в том числе полупроводниковые, материалы, способные излучать свет, а также диэлектрики и надежные проводники. Выбор проводящих материалов, пригодных для печати, несколько ограничен условиями струйной печати. Идеально размер частиц должен быть меньше 1 мкм, а вязкость и поверхностное напряжение материала должны соответствовать конкретным условиям печати. Тем не менее, для производства печатных плат, межсоединений и антенн струйной печатью используются различные технологии. По своим свойствам изготовленные струйной печатью схемы могут отличаться от традиционных печатных плат. Так, поверхностное сопротивление наносимых струйной печатью материалов много больше, чем у традиционно используемого в печатных платах медного лакированного ламината, а минимальные размеры элементов несколько больше, чем у лучших полупроводниковых компонентов. И тем не менее, сегодня струйная печать печатных плат находит широкое применение.

Цифровой характер струйной печати весьма привлекателен при производстве электронных устройств. В цикле проектирования электронного устройства этап разработки топологии и создания опытных образцов всегда вызывает большую нервотрепку. И хотя доля стоимости платы в конечном освоении в массовом производстве изделия может быть относительно мала, стоимость начального опытного образца, заказного разработчиком системы, может быть достаточно высокой. Помимо стоимости исправления ошибок, обнаруженных в опытном образце платы, затягивание сроков разработки из-за необходимости проведения итераций вызывает серьезную озабоченность как разработчика, так и руководителя проекта, одной из основных задач которых является своевременный выпуск проектируемого устройства на рынок. Вот почему концепция периферийной системы, которая может быть непосредственно подключена к компьютеру для преобразования данных, полученных в ходе автоматизированного проектирования, в копию опытного образца, столь привлекательна. Именно такой системой и являются установки струйной печати.

## **СОВРЕМЕННЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПЕЧАТНЫХ ПРОВОДЯЩИХ СОЕДИНЕНИЙ**

Печатные токопроводящие соединения уже давно используются в полимерных толсто пленочных печатных

схемах. Во многих случаях для нанесения паст на основе проводящих материалов, таких как пасты с частицами углерода или серебра, используются методы шелкографии, флексографии, гравировки. Однако реологические свойства и размеры частиц такого материала неприемлемы для большинства систем струйной печати.

К одной из первых групп проводящих материалов, пригодных для струйной печати, относятся проводящие полимеры. На основе работы А.Хигер, А.МакДиармид и Х.Сиракава по легированию полиацетилена парами йода были получены растворимые проводящие полимеры, пригодные для струйной печати. Сейчас наиболее широко используется материал на основе смеси поли(3,4-этилендиокситиофен) и поли(4-стирен) сульфонат (PEDOT:PSS). Этот материал пригоден для получения пленок путем струйной печати с использованием специальных печатающих головок, способных выдерживать водные растворы проводящих чернил и возможное их коррозионное воздействие. Правда, при использовании PEDOT:PSS нельзя получить пленки с поверхностным сопротивлением менее 100 Ом/кв.

Лучшие результаты достигнуты в случае применения серебряных паст. Это частично обусловлено относительно высокой проводимостью естественного оксида, образующегося на частицах серебра. Чтобы решить проблему непригодности для струйной печати



металлических частиц большого размера, обычно используемых при трафаретной печати, изготовители для получения стабильных растворов серебряных частиц субмикронных размеров применяют технологию нанодисперсии. Правда, даже при более чем 50%-ном наполнении раствора частицами серебра при учете их удельного веса наполнение раствора по объему частиц уже нельзя считать достаточным. В результате для получения пленки нужной толщины приходится выполнять несколько этапов печати. К недостаткам паст на основе наночастиц серебра относится и агрегация частиц, несмотря на их малый размер (менее 1 мкм), особенно при использовании паст с большим наполнением серебра. Вследствие этого надежность струйной печати может ухудшаться.

Поверхностное сопротивление пленок, полученных с использованием чернил на основе наночастиц серебра, составляет десятки или даже сотни ом на квадрат. Для увеличения проводимости пленок обычно проводится их отжиг при относительно низкой температуре (100–150°C), в результате которого удаляется большая часть оставшегося связующего органического материала, применяемого для достижения нужных реологических свойств чернил. Правда, для получения оптимальных характеристик желательно проводить отжиг паст при температуре выше 250°C. Поскольку размеры частиц металла субмикронные, их температура плавления меньше, чем обычно, и паста плавятся при температуре, которая существенно ниже температуры плавления металла. Тем не менее, отжиг при такой температуре не позволяют использовать подложки из дешевых материалов, например полиэтилентерефталата (PET).

Процесс струйной печати проводящих соединений можно разбить на две отдельные операции. Первоначально печатается материал-катализатор, который затем в ходе последующей операции нанесения металлического слоя преобразуется в проводящее покрытие, можно отделить друг от друга такие требования, как обеспечение надежной струйной печати и высокой проводимости покрытия. В промышленности печатных плат для нанесения покрытий в сквозные отверстия широко используется метод химического восстановления. Ионы металла водного раствора оседают на поверхности подложки в результате каталитического восстановления. Химический состав ванны подбирается так, чтобы осаждаемый металл представлял собой эффективный катализатор реакции восстановления, тем самым обеспечивая дальнейшее нанесение покрытия после полного покрытия им исходного катализатора. Путем ввода каталитических материалов в состав чернил для струйной печати можно формировать нужный рисунок без поиска компромиссов между толщиной результирующей пленки и надежностью печати. Поскольку проводимость получаемой пленки зависит от продолжительности погружения подложки в ванну для нанесения гальванического покрытия, толщи-

на первоначального печатного слоя не влияет на проводимость окончательного покрытия. Современные ванны для нанесения гальванического покрытия позволяют получать слои толщиной более 30 мкм. Правда, механические свойства металлических пленок такой толщины неудовлетворительны. Поверхностное сопротивление современных поддающихся дальнейшей обработке пленок, полученных методом химического восстановления, составляет менее 30 мОм/кв, и, таким образом, они пригодны для широкого применения.

К достоинствам проводящих линий, нанесенных струйной печатью и методом химического восстановления, относится и простота пайки, и возможность выполнения традиционных процессов изготовления печатных плат, таких как нанесение иммерсионного золота по подслою никеля, иммерсионного олова или серебра, нанесение предотвращающих окисление покрытий и органических защитных покрытий.

Характеристики различных проводящих соединений, полученных струйной печатью приведены в таблице.

#### **КАЧЕСТВО СТРУЙНОЙ ПЕЧАТИ**

Струнные принтеры с разрешением выше 2400 dpi сегодня можно найти и дома, и в офисе. К сожалению, такие принтеры могут использоваться лишь с весьма ограниченным видом чернил и определенными мате-

## Сравнение свойств технологий формирования проводящих соединений

Характеристика	Проводящие полимеры	Чернила на основе наночастиц серебра	Углеродные чернила	Проводники, получаемые печатью и методом химического восстановления
Проводимость	Низкая	Потенциально высокая	Низкая	Высокая
Производительность струйной печати	Высокая	Приемлемая	Низкая	Высокая
Материал подложки	Высокотемпературный	+	+	+
	Низкотемпературный	+	+	+
	Пористый	-	+	-
Паяемость	+	Возможна	-	+
Энергопотребление	Низкое	Низкое	Низкое	Среднее
Стоимость	Низкая	Высокая	Низкая	Низкая

риалами подложек. Обычно разрешение используемых в промышленности печатающих головок, предназначенных для изготовления печатной электроники, много меньше. Как правило промышленные печатающие головки содержат 50–360 наконечников на 1 дюйм (2–15 наконечников на 1 см). Достоинство такой печатающей головки – широкий диапазон пригодных для печати чернил с различными значениями вязкости и поверхностного напряжения. Многие изготовители разработали печатающие головки струйных принтеров, стойкие к воздействию коррозионных жидкостей и агрессивных смесей и пригодных для нанесения разнообразных материалов.

Один из распространенных материалов, используемых сегодня в промышленных устройствах струйной печати, – это отверждаемые УФ-излучением чернила. Это объясняется следующими их достоинствами:

- значительным сокращением длительности сушки. УФ-отверждение практически выполняется мгновенно, что особенно важно при производстве схем с рулона на рулон, когда чернила должны высохнуть до свертывания печатных схем;
- высокой надежностью струйной обработки. Вязкость чернил, содержащих растворители, увеличивается по мере испарения растворителя и оседания



**Рис. 1. Ступенчатый характер краев диагональных линий на микросхеме ВЧ-антенны для RFID-устройства**

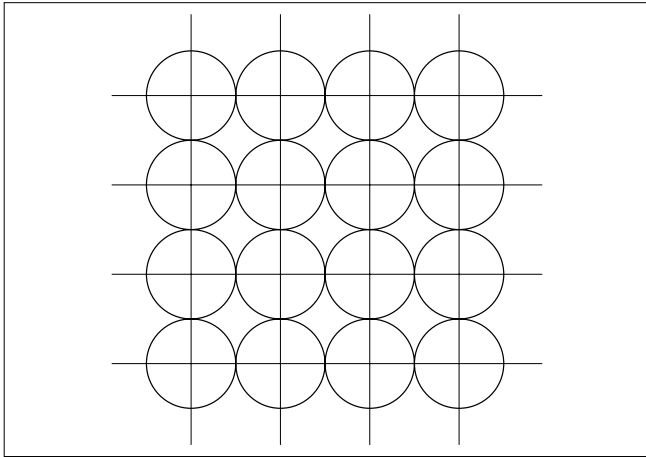
на передней стенке печатающей головки принтера. Поскольку УФ-отверждаемые чернила не испаряются и требуют отверждения, а не сушки, их реологические свойства не меняются;

- улучшением качества получаемого рисунка. При сушке отверждение чернил с растворителями может быть неполным и они будут растекаться по подложке. При полном или частичном УФ-отверждении чернил достигается высокое качество получаемого рисунка;
- наличием разнообразных пригодных для УФ-отверждения реактивных веществ с хорошей адгезией к подложке. Разработаны УФ-отверждаемые чернила, которые реагируют с подложкой и "впекаются" в ее поверхность, образуя ковалентные связи с ее материалом.

Для улучшения совместимости со специфическими функциональными материалами при сохранении некоторых из перечисленных достоинств можно объединять методы УФ-отверждения и сушки.

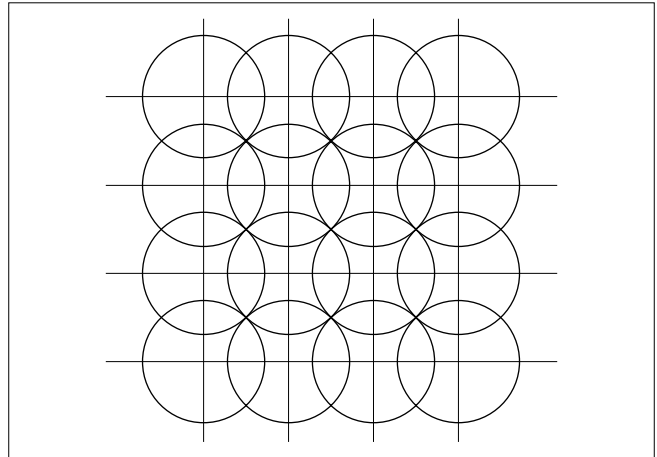
Ширина печатных дорожек и зазоров между ними увеличивается на дискретные значения (пиксели или минимальные элементы изображения). Это можно проиллюстрировать на фотографии печатной схемы антенны с контактными площадками для монтажа микросхем методом перевернутого кристалла (рис.1). Расстояние между четырьмя контактными площадками схемы равно ~180 мкм. Разрешение при печати антенны составляло 360 dpi. На диагональных линиях сужающихся лепестков антенны ясно видны ступеньки, число которых растет по мере уменьшения ширины лепестка на пиксел за шаг. Шаг пикселей при разрешении 360 dpi составляет ~70,5 мкм, при этом наименьшая ширина дорожки равна 150 мкм. Причина этого показана на рис.2. Если 70-мкм капли чернил наносить в пересечения сетки с шагом 70 мкм, полного покрытия сетки получить не удастся. Капли будут лишь касаться друг друга по вертикали и горизонтали, оставляя зазоры по диагонали. Идеальное покрытие можно по-





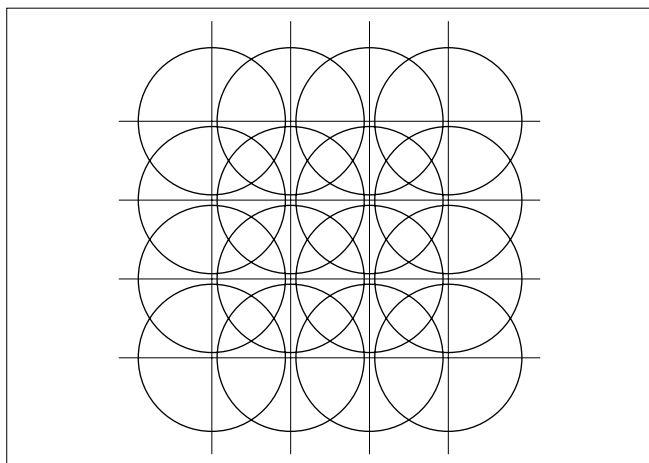
**Рис.2. Капли диаметром 70 мкм, нанесенные на сетку с шагом ячеек 70 мкм**

лучить при нанесении на сетку с шагом 70 мкм капли диаметром 101 мкм (рис.3). Это самый малый возможный при заданном разрешении размер пиксела для получения полного покрытия. Более практично для сетки с шагом 70 мкм использовать капли диаметром 150 мкм (рис.4). Помимо полного покрытия поверхности это обеспечивает хорошие допуски на смещение параметров системы печати, таких как изменение поверхностной энергии подложки.



**Рис.3. Идеальный случай нанесения капель диаметром 101 мкм на сетку с шагом 70 мкм**

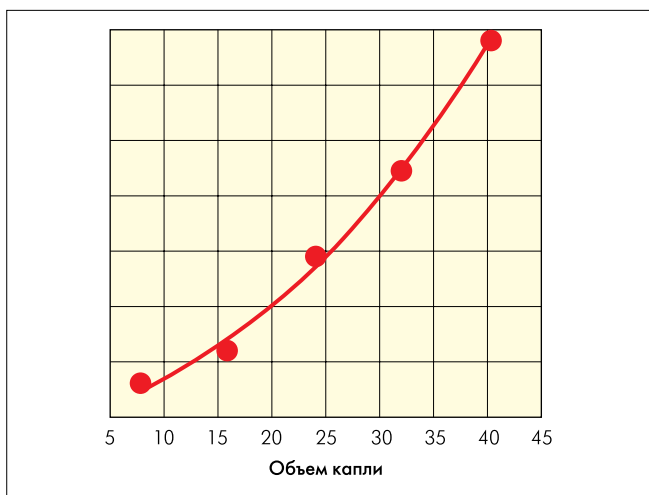
Многие изготовители сообщают о получении элементов размером 10–15 мкм. Некоторые для создания элементов субмикронных размеров даже используют методы электростатического ускорения. Но, как правило, это образцы размером в несколько миллиметров, созданные в идеальных лабораторных условиях и по технологии, не пригодной для массового производства. Реальные минимальные размеры элементов, получаемые с помощью имеющегося промышленно-



**Рис.4. Реальная картина при нанесении 150-мкм каплей на 70-мкм сетку**

го оборудования с однократным прогоном, все еще составляют 100–250 мкм, для оборудования с многократным прогоном возможно получать минимальный размер ~50 мкм.

Ступенчатый рисунок диагональных линий на рис.1 может быть несколько спрямлен за счет применения технологии градации серого (Grayscale technology). Согласно этой технологии, точки сетки могут заполняться или оставаться пустыми, при этом капли могут иметь различные дискретные размеры. Это достигается путем формирования каждой капли чернил в результате слияния нескольких капель меньшего диаметра. Если объем капли типичной бинарной промышленной печатающей головки (головка черно-белой печати), рассчитанной на разрешение 360 dpi, составляет  $40 \cdot 10^{-12}$  л, то Grayscale оборудование с тем же разрешением работает с каплями того же объема, получаемыми в результате быстрого "выстреливания" и слияния до попадания на подложку пяти мини-капель объемом  $8 \cdot 10^{-12}$  л каждая.



**Рис.5. Зависимость ширины линий от объема капли при выполнении печати по технологии Greyscale**

Возможность варьировать число "мини-капель в одной капле" при работе бинарной системы струйной печати позволяет уменьшать размеры ступенек, создавая тем самым иллюзию увеличения разрешающей способности. Зависимость ширины однопиксельных линий от серого уровня, т.е. от объема капли, соответствует кривой масштабирования ступенек при изменении объема двухмерной капли-диска чернил пропорционально ее квадрату (рис.5). На практике существуют два предела масштабирования ступенек: для капель малой толщины, объем которых зависит от квадрата их радиуса (случай избыточной смачиваемости чернил, см. рис.5) и для сферических капель, объем которых пропорционален кубу радиуса (случай несмачиваемых чернил). Хотя кривая, приведенная на рис.5, соответствует параболической зависимости между объемом капли и шириной линии, получаемая ширина линии по-прежнему изменяется ступенчато. Правда, в определенных случаях путем "очистки" краев линий за счет добавления в центр рисунка линий, формируемых каплями различных размеров, поверхностное напряжение чернил может способствовать спрямлению краев.

Сегодня производство электронных устройств с помощью струйной печати стало реальностью. И хотя углеродные чернила ненадежны, а удельное сопротивление проводящих полимеров велико, использование чернил на основе наночастиц серебра и каталитических чернил для печати и нанесения проводников методом химического восстановления позволяет получать приемлемые уровни проводимости и механических свойств. Поскольку изготовленные печатью и методами нанесения электролитического покрытия проводники сходны с проводниками, формируемыми традиционными методами, появляется возможность проведения таких процессов, как нанесение иммерсионного золота по подслою никеля, иммерсионного олова или серебра, нанесение предотвращающих окисление покрытий и органических защитных покрытий.

Требования, предъявляемые к свойствам материалов, предназначенных для струйной печати электронных устройств, исключают возможность применения настольных струйных принтеров, рассчитанных на работу с водными растворами чернил. В большей степени приемлемы промышленные печатающие установки, к достоинствам которых относится совместимость с достаточно широким диапазоном материалов, и возможность работать как с водными растворами чернил, так и с УФ-отверждаемыми чернилами и чернилами на основе растворителей.

Окончательный фактор, определяющий возможность широкого освоения эффективного производства электронных устройств методами струйной печати, — программные средства растровой обработки изображения для установок такой печати, которые сейчас активно разрабатываются. ■