

Варианты формирования рисунка в производстве печатных плат

Формирование схем обычно происходит методом фотолитографии или трафаретной печати, однако для завершения процесса формирования схем печатная плата подвергается травлению, металлизации и снятию фоторезиста. В этой статье акцент делается только на фотолитографию и ее эквивалентные варианты, такие как струйная печать, с одним исключением: на первый план выдвигаются заменители традиционных субтрактивных процессов. В их число входят варианты полуаддитивной и полностью аддитивной технологии. В статье не упоминается господствующее направление — традиционная контактная печать, включающая использование фотшаблона (или маскирующего слоя), однако ее конкурентам уделяется особое внимание. Многие процессы, описанные в этой статье, являются новыми (но не все). Поскольку область нововведений изобилует случайностями, то, чтобы получить верное представление о перспективе развития, в нее включены многообещающие, но в настоящее время приостановленные технологические инициативы. Кроме того, некоторые из ранних разработок, упоминаемых автором, могут прекратить свое существование к тому времени, когда статья выйдет из печати.

Джо Дудек

JoeDudeck@ipc.org

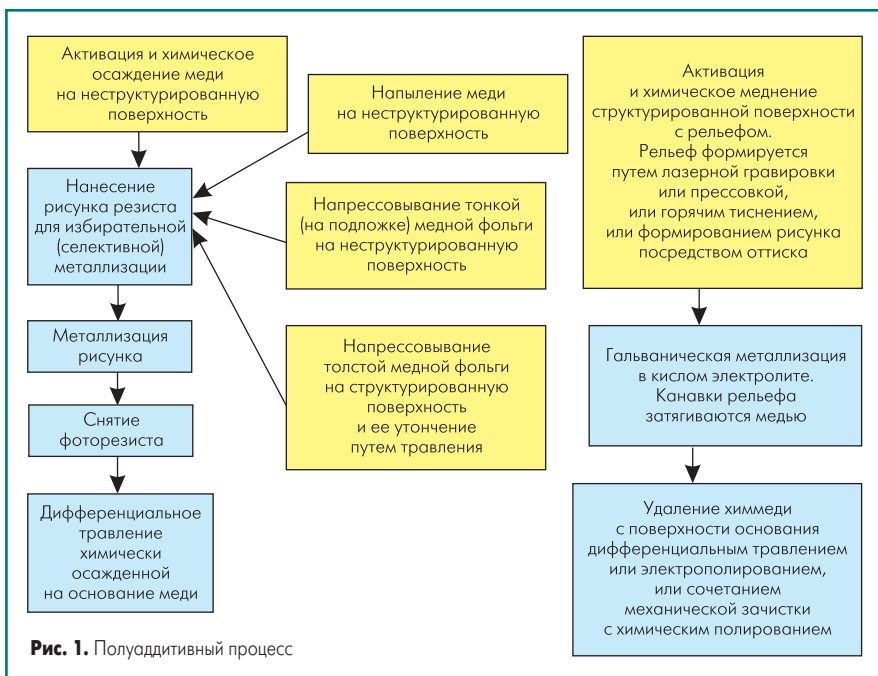
Полуаддитивный процесс и полностью аддитивная технология

На рис. 1 дано общее представление о полуаддитивном процессе (ПАП). Последовательность процесса, представленная слева на рис. 1, применяется при формировании рисунка с микроотверстиями методом послойного наращивания для монтажа

кристаллов методом flip-chip. На неструктурированную (плоскую) наращенную поверхность диэлектрика и стенки сквозных микроотверстий химически осаждается медь, наносится рисунок из резиста, медь избирательно осаждается, резист удаляется и осуществляется дифференциальное травление химически осажденной на основание меди. При таком подходе печатная схема не защищена металлорезистом.

Основным моментом является адгезия химически осажденной меди к поверхности диэлектрика с микрошероховатостями. Процесс нуждается в тщательном контроле и современных материалах диэлектрического основания и фоторезиста. Вместо химмеди в качестве основы можно использовать медную фольгу, чтобы обеспечить хорошую адгезию меди. Эта фольга может быть в виде тонкого слоя меди на медной подложке или в виде более толстого слоя меди, утонченного травлением. Оставшаяся медная основа все еще толще, чем химмедь, и это делает невозможным формирование очень тонких печатных проводников (<30 мкм). Шероховатости поверхности («зубчики») фольги также становятся проблемой для очень высоких частот вследствие скин-эффекта, так что для высокочастотных слоев рассматривается вариант более гладкой меди, нанесенной напылением.

Справа на рис. 1 представлена схема процесса, который включает формирование рельефа в поверхности диэлектрика в качестве рисунка схем. Канавки рельефа можно формировать лазерным гравированием [3], прессованием, горячим тиснением или отиском [4]. Затем вся поверхность диэлектрика



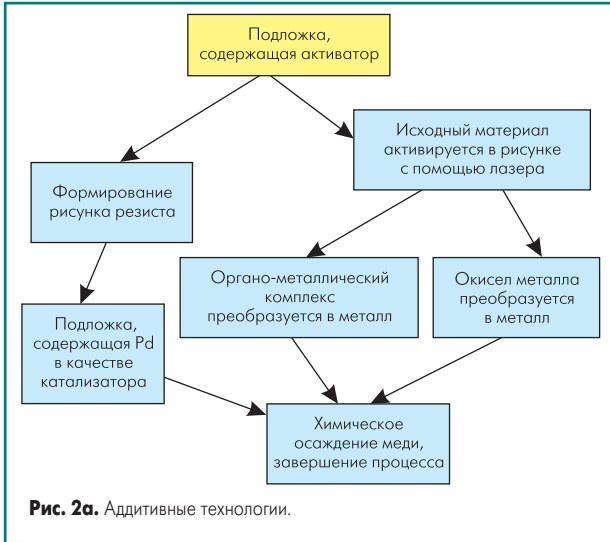


Рис. 2а. Аддитивные технологии.

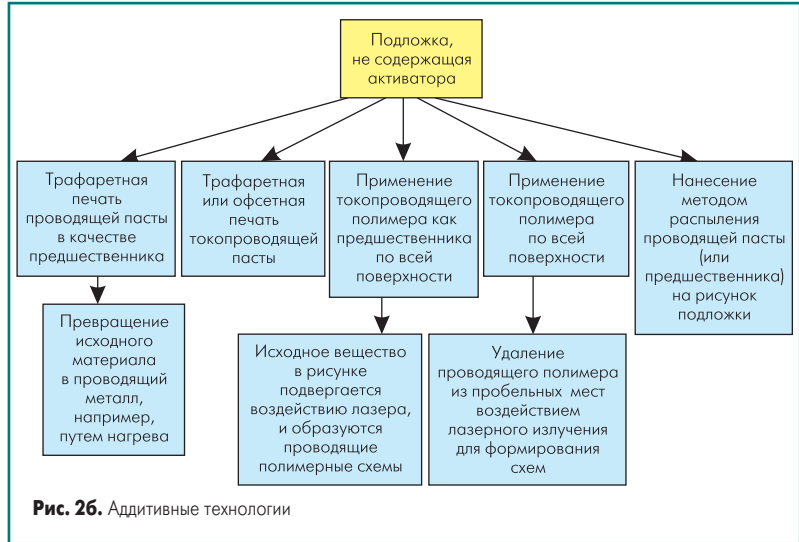


Рис. 2б. Аддитивные технологии

покрывается химмедью с последующим гальваническим осаждением меди в высокоскоростном электролите, специально предусмотренном для металлизации глухих отверстий или рельефа. Излишки меди с поверхности убираются посредством избирательного травления, электрополировки или процесса химико-механической полировки. Металлизация рельефа заглублена в плоскую поверхность подложки и сцеплена с ней по трем сторонам канавки, что дает большую прочность сцепления проводников к подложке. Процесс «Transfer lamination» [5], не показанный на рис. 1, дает тот же результат: рисунок резиста формируется на проводящем слое (например, нержавеющей стали). На этот слой наносится медный рисунок, резист удаляется, а медный рисунок переносится (впечатывается) на препрег*.

На рис. 2а представлен вариант полностью аддитивной технологии, согласно которой подложка содержит «активатор», дающий начало химическому осаждению меди. Активатором может быть палладий, как это было в случае с классическим полноценным процессом толстослойного химического меднения по Коллморгену. Резист в данном применении должен обладать стойкостью к воздействию сильной щелочной среды в течение нескольких часов. Альтернативой этому процессу может быть применение различных активаторов, таких как органо-металлический комплекс или окислы металлов, которые преобразуются в металл под воздействием лазерного излучения [6, 7], с последующим химическим осаждением меди.

На рис. 2б представлены аддитивные технологии, которые начинаются с плоской подложки без введенного активатора. В одном таком процессе (Parmod Technology фирмы Parelec, Inc.) методом трафаретной печати наносится исходный материал — проводящая паста. При нагревании исходный материал превращается в проводящий металл. В качестве альтернативы на подложку может быть нанесена проводящая паста методом трафаретной или офсетной печати. Паста может иметь достаточную проводимость, чтобы служить непосредственно проводником

в устройствах с низким потреблением тока, она может также служить основой для электролитического осаждения меди [8]. Еще один вариант этой технологии включает покрытие поверхности подложки токопроводящим полимером, который под воздействием лазерного излучения формирует рисунок схемы [9]. Как вариант, полимерное покрытие может представлять собой непроводящий слой, который превращается в проводящий полимер под воздействием лазерного излучения. Примером может служить полимер «РАТАС» [10]. Самым новейшим достижением в области аддитивной технологии является разработка корпорации Seiko Epson (см. табл. 3) — нанесение методом струйной печати проводящего рисунка (или рисунка диэлектрика) [11].

Варианты лазерного формирования рисунка

На рис. 3 дано общее представление о вариантах лазерного формирования рисунка.

Первой в голову приходит технология непосредственного нанесения изображения с помощью лазера, которая включает экспонирование фоторезиста, пиксель за пикселем, с помощью лазерной головки. Такие установки предлагаются фирмами Orbotech [12], Asahi Optical [13], Fuji и др. Подробности смотрите в таблице 1.

После нескольких лет относительного затишья производители ПП снова проявили интерес к прямому нанесению изображения с помощью лазера (LDI). Оказалось, что существует несколько побуждающих факторов для этой разработки, а именно растущая потребность в следующем:

- в формировании изображения с точным позиционированием небольших деталей на больших форматах;
- в улучшении точного послойного совмещения;
- в «масштабировании» изображения, то есть изменение размеров изображения и смещение изображения для наиболее точного

Таблица 1. Технология прямого формирования изображения лазером

Примеры	Особенности
УФ-лазер (аргон) Примеры: DP100 (Orbotech, Израиль), Atoma-Technical (Франция)	Плоская плата, одностороннее экспонирование, использование стандартного чувствительного к воздействию УФ фоторезиста с высокой чувствительностью к УФ-излучению для высокопроизводительных процессов
Твердотельный УФ-лазер Пример: Germini (Maria-Bosco)	Вертикальное, двустороннее экспонирование. Автоматическая загрузка и разгрузка.
Твердотельный УФ-лазер Примеры: Pentas (Asahi Kogogaka)	Структура блока формирования изображений сходна с видимым лазерным изображением Pentas. Твердотельный лазер от фирмы Spectra, серийное производство организовано в 2002 г.
Твердотельный лазер УФ-излучения Примеры: DP-1005L (Orbotech, Израиль)	Производительность: 150 отпечатков/час. Разрешающая способность: 6,3 мкм или 5 мкм. Источник излучения: твердотельный лазер 3–4 кВт. Минимальный размер подложки: 660×815 мм. Минимальная площадь изображения: 609×812 мм. Минимальное расстояние между линиями: 50 мкм. Точность позиционирования: ±1,2 мкм. Совмещение по бокам: 24 мкм.
Лазер с видимым (зеленым) излучением Пример: DI 2000 (Asahi Kogogaka)	Использование специальной сухой пленки или фоточувствительного жидкого фоторезиста
Тепловой лазер (thermal laser — CO ₂) Примеры: Diamond 2028F (CREO)	Конструкция наружного барабана пригодна для формирования изображения
Лазер с видимым излучением (405 нм) DI-2080 от фирмы Pentax (Asahi Optical)	DMD (цифровое микроустройство). Минимальный размер элемента: 15 мкм. Точность позиционирования (повторяемость): ±7,5 мкм. Совмещение по сторонам: ±10 мкм. Время экспонирования: 35 с для 340×510 мм.
Полупроводниковый лазер с видимым излучением (405 нм) от фирмы Fuji.	Многokrратное расщепление пучка для высокой скорости экспонирования. Экспонирование 10 с для платы размером 510×600 мм. Минимальный размер элемента: 10 мкм.

* Метод переноса (прим. ред.)

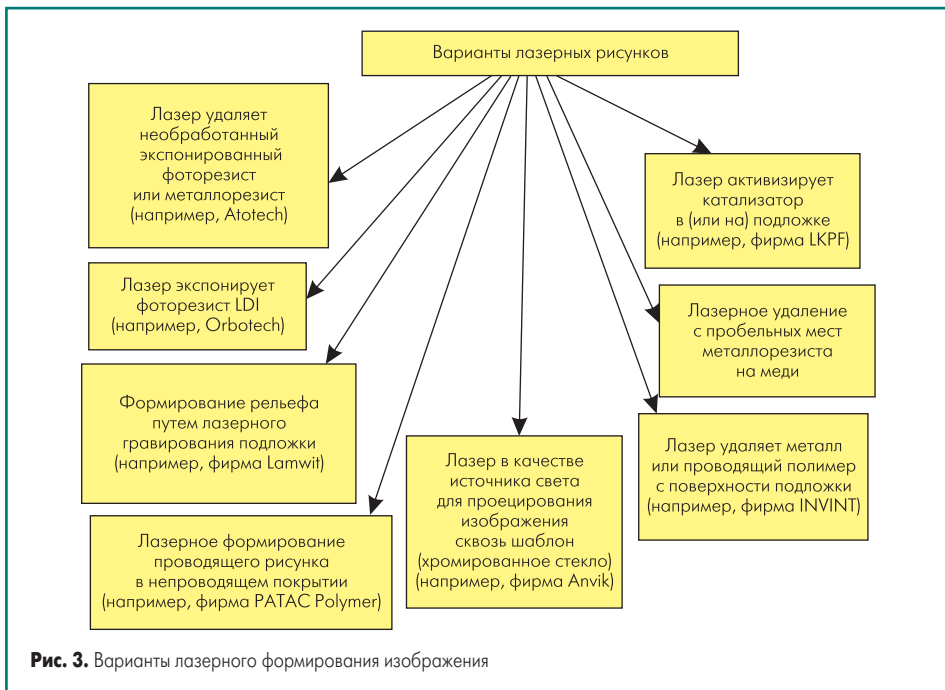


Рис. 3. Варианты лазерного формирования изображения

Таблица 2. Технология формирования изображения путем удаления воздействием лазерного излучения

Примеры	Особенности
Тип ND YAG. Пример: система LS 350 (Siemens)	Формирование изображения путем удаления тонкого слоя олова воздействием лазерного излучения с последующим травлением рисунка по олову.
Тройной UF YAG. Пример: ESI модель SIGO	Формирование изображения путем удаления фоторезиста, экспонированного на необработанной поверхности на небольших участках высокой плотности межсоединений. Участки с более низкой плотностью экспонируются путем традиционной фотолитографии.
Удаление лазерным излучением органического материала основы. Пример: LAMWII — технология нанесения микросоединений путем удаления материала лазерным излучением фирмы Mutek	Лазер прорезает канавки в органическом материале основы, после чего производится вакуумное напыление тонкого медного покрытия на поверхности. Затем канавки покрываются гальванической медью, а медь на поверхности сдирается или избирательно вытравливается для формирования проводников в рельефе.
Удаление лазерным излучением резиста для литографии. Пример: процесс формирования схем LDC путем прямого воздействия лазерным излучением фирмы Atotech	Органический резист для литографии наносится на поверхность платы сплошным слоем и в сквозные отверстия методом погружения, с последующим погружением для окраски покрытия в цвет, контрастный меди, за которым следует этап сушки. Затем покрытие структурируется с помощью лазера (удаляется воздействием лазерного излучения). Скорость обработки — одна сторона платы за 70 с. После щелочного травления резист обрабатывается слабой кислотой.
Процесс формирования изображения с помощью УФ-лазера фирмы LKPF KtF	УФ-излучение лазера KtF наносит изображение сквозь защитный слой из хрома и удаляет очень тонкий слой меди (например, 0,05 мкм) с подложки. Процесс применим для гибких схем, с которых удаляется тонкий слой меди и связующее покрытие (ie-coat) из металла (хрома) для формирования проводящего рисунка. Рисунок из меди затем может быть металлизирован. Процесс пригоден для моделирования плат с очень тонкими межсоединениями.
Удаление слоя металлического или органического резиста излучением лазера Nd YAG с модуляцией добротности (355 мкм), фирма LKPF Laser & Electronics Ag (Germany, US).	Этот лазер пригоден для формирования сквозных микроотверстий, структурирования схем, а также для маршрутизации в производстве серийной продукции. Модель Microline Drill 600 можно использовать для структуризации медных схем и для удаления слоя меди на регулируемую глубину. Оставленный тонкий слой меди для защиты диэлектрика затем вытравливается.

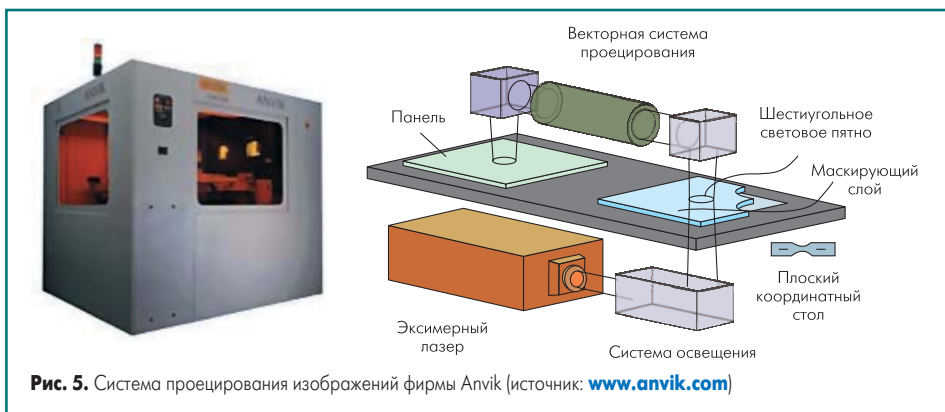


Рис. 5. Система проецирования изображений фирмы Anvik (источник: www.anvik.com)

совмещения со смещенным или искаженным с эталонным изображением;

- в более низкой стоимости эксплуатации системы LDI.

Эти требования в настоящее время удовлетворены за счет улучшения возможностей формирователя изображений LDI, более продолжительному сроку службы и более низкому



Рис. 4. Маркировка лазером (источник: Control Micro Systems; www.cmslasermarking.com)

потреблению энергии твердотельного лазера, а также современным фоторезистам для первичного изображения и трафаретам для нанесения припоя с удовлетворительной скоростью.

На рис. 3 показано несколько методов лазерного формирования изображений. Лазеры использовались для формирования рисунка на фоторезисте в «островках высокой плотности межсоединений» после того, как посредством традиционной фотолитографии была сформирована структура рисунка резиста, к которой предъявляются меньшие требования. Еще одним примером использования лазеров является процесс формирования рисунка лазером за счет полимеризации жидкого органического резиста, в который погружено основание платы. На отдельном этапе методом погружения резист раскрашивается цветом, контрастным цвету меди. «Lamwit» [3] — пример удаления материала диэлектрического основания воздействием лазерного излучения. Технология фирмы Siemens представляет собой пример избирательного удаления олова, нанесенного методом погружения, воздействием лазерного излучения с металлизированной платы, с последующим щелочным травлением. В технологии прототипного производства фирмы INVINT лазер используется для удаления проводящего полимерного покрытия для формирования рисунка схемы.

В контексте удаления воздействием лазера следует также упомянуть процесс маркировки ПП с помощью лазера фирмы Control Micro Systems [14] (рис. 4).

Подробности смотрите в таблице 2.

Примеры применения лазера, отличающиеся от выше упомянутых примеров с LDI и удалением материала воздействием лазерного излучения: фирма Anvik использует эксимерный лазер в качестве источника излучений в своей системе проецирования изображения большого формата Anvik HexScan 2100 SPE [15] (рис. 5); лазерная система LKPF для активации рисунка затравки на 3D-структурах [6].

Применение струйной печати в производстве ПП

Первым успешным применением струйной печати в производстве ПП было создание надписи красителем на трафарете для нанесения припоя [16–21]. И это неудивительно, поскольку такое применение тесно связано с первоначальным применением струйной печати на бумаге, и это говорит о сильных сторонах струйной печати: нанесение краски тонким слоем, ограниченные требования к разрешающей способности, управляемость с помощью цифровых данных.



Таблица 3. Технология формирования изображения методом струйной печати

Технология формирования изображения	Примеры	Особенности
Метод струйной печати для нанесения маркировки	Струйная печать, управляемая системой автоматизированного проектирования для печати надписей	В струйной печати рисунок надписи наносится сильной струей непосредственно на трафарет для нанесения припоя. Другие способы применения включают, например, матрицы столбиковых выводов из припоя, встроенные пассивные компоненты, резист для печатных плат и для литографии. Примеры: SD-1000 (Pentax); Newprint (New System); OPL (Jetmask Ltd.); печатающее устройство для надписей LGP 809; Spectrum Legend Digital Direct (Olec, (Швейцария). Печатающее устройство для надписей CP400 Circuit Printer (выпрыскивающая головка от NVV...M; сопло (?) от фирмы Spectra для инъекции горячим методом. Установка для струйной печати от фирмы Mivatec (Германия), выполненная на основе M/VA 28 ? фирмы Mindec. Series plotter platform architecture (Япония). Печатающее устройство для надписей фирмы Yokogama, Япония. Установка Microjet 6050 DLP от MicroCraft для прямой печати надписей в комплекте с электрическим прибором для испытаний. Головка для устройства струйной печати, модель 4000 от MARSCHEM Corporation, которой комплектуется несколько печатных систем различных поставщиков.
Струйная печать резиста методом «print-and-etch»	Автоматизированная струйная печать для нанесения резиста методом «print-and-etch»	Автоматизированное печатающее устройство наносит рисунок резиста типа «print-and-etch» непосредственно на медную поверхность внутреннего слоя или на металлизированную по заготовке печатную плату с металлизированными сквозными отверстиями. Прототип снабжен восемью распыляющими головками. Резист представляет собой материал с точкой плавления около 80 °С, образующий неровную поверхность. Он наносится струей в горячем жидком состоянии и затвердевает при контакте с поверхностью платы. Рисунок наносится на платы одновременно с обеих сторон. Резист перекрывает и предохраняет от травления слой меди в сквозных отверстиях плат, металлизированных по заготовке. Удаление резиста происходит путем пропускания плат через горячую воду, которая растворяет и удаляет волнистый резист. Резист можно использовать повторно.
	Автоматизированная струйная печать DirectMask 65 для нанесения резиста методом «print-and-etch» (Solenoid)	Были получены токопроводящие дорожки и промежутки в 100 микрон. Прямо на печатающей головке установлена УФ-сушка, чтобы быстро обработать проводящие дорожки резиста и предупредить стекание капелек резиста. Основание платы имеет структуру, которая сверлится лазером. Резист от фирмы Shipley.
Формирование изображения методом диффузии	Автоматизированная струйная печать для нанесения рисунка на подложку с предварительно нанесенным покрытием	Избирательное растворение (или нерастворение), например, путем нанесения химического вещества струей на резист. Процесс управляется цифровыми видеоданными. Не используется для серийного производства (патент США, 5.275.689; 5 306 756.3546 выдан Джону Джеймсу Фельтерну, и др., DuPont).
Устройство струйной печати для нанесения рисунка методом «print-and-etch» и трафарета для нанесения припоя	Фирма Awaca Electronics Materials (Великобритания). Трафареты для нанесения припоя и пасты для травления, используемые для струйной печати, фирма Jetack в сотрудничестве с поставщиками систем печати	
Нанесение методом струйной печати структур многослойного диэлектрика и проводника	Фирма Seiko Epson Corp.	Устройство струйной печати (головка Mach, пьезоэлектрическая, не нагреваемая) наносит струей пасту диэлектрика и проводника (микрочастицы серебра с органическим покрытием). Рисунок металлических межсоединений выпрыскивается в слой диэлектрика и запекается при температуре 150–200 °С. Металлические столбиковые выводы для обеспечения межсоединений по оси Z и изолирующий слой наносятся струйным методом. С помощью этой технологии была выполнена 20-слойная плата размером 20×20 мм.

Таблица 4. Технология формирования изображения путем проецирования

Примеры	Описание
Системы пошагового экспонирования от фирмы ADTEC	Система линз для проецирования с высокой интенсивностью. Обычные размеры зоны экспонирования: от 100×100 до 150×150 мм. Шаговое перемещение световой головки по фотошаблону из хромированного стекла. Управление размером изображения осуществляется путем перемещения фокуса.
Пример формирования изображения лазером: система Anvik	Проецирование 1:1, источник — эксимерный лазер KrF (УФ, диапазон 351–353 нм). Фотошаблон и плата укреплены на плоском координатном столе с постоянным перемещением. Большую маскированную область можно в фоновом режиме посточно сканировать лучом лазера большого поперечного сечения (около 16 см ²). Пригоден для гибких и жестких подложек.
Проецирование с помощью «динамических фотошаблонов», таких как макрозеркала или цифровая матричная светоголовка. Примеры: Minatec MDI (Memory Direct Imager) — формирователь видеоизображений прямо из памяти (снят с производства). Full Semiconductor's Direct Imaging System и CUVIS Автоматизированная система формирования УФ-изображений фирмы FSL.	<ul style="list-style-type: none"> Динамичный цифровой фотошаблон (например, DMD — Digital Micromirror Device — цифровое устройство с микрозеркалом). Источник УФ-излучения. При проецировании размер изображения уменьшается. Шаровой полупроводник Allen TX с использованием TL DWD, цифровое устройство с микрозеркалом. Источник УФ-излучения. При проецировании размер изображения уменьшается. Цифровой матричный трафарет (шаблон); источник света сканирует по неподвижной подложке.
LSA600 (Хайдельберг) — формирование изображения путем проецирования через стеклянный шаблон	Источник излучения — лазер с УФ-излучением (YAG). Размер пикселя примерно 5 мкм. Формирование изображения через шаблон из хромированного стекла. Шаблон совмещается с основанием платы. Плата перемещается в направлении оси X (шириной 10 мм). Движение по оси Y шириной 30 мм охватывается оптикой

Следующее применение (успешное, хоть только и на ранней стадии) — это струйная печать резиста для травления (табл. 3). Здесь также оказалось достаточно относительно тонкого покрытия, свободного, тем не менее, от точечных дефектов.

Применение струйной печати для нанесения гальванического резиста или трафарета для нанесения припоя гораздо более проблематично, поскольку для более толстых покрытий требуется нанесение нескольких слоев и хорошая выраженность боковых стенок. Формирование изображения методом диффузии оказалось удачным выходом из положения: краситель, нанесенный струей, используется не для наращивания резиста, а для формирования его рисунка. В основе этого процесса лежит селективное растворение (или нерастворение) посредством, например, распыления красителя на резист. Процесс распыления регулируется в соответствии с данными цифрового изображения. Примером может служить распыление аминного раствора на подложку, плакированную медью и покрытую неэкспонированным негативным фоторезистом. Амин селективно растворяет резист, который затем проявляется и экспонируется по необработанной поверхности. Этот процесс не применяется в серийном производстве (запатентовано фирмой DuPont). Новым и очень впечатляющим способом применения струйной печати в производстве ПП является аддитивная многослойная технология Seiko Epson (табл. 3), по которой этим методом наносится рисунок как диэлектрика, так и проводника.

Проецирование изображений

В таблице 4 дается общее представление об оборудовании для проецирования изображений.

Пошаговое проецирование изображений — это предпочтительная технология в производстве ИС. В настоящее время она применяется для формирования схем с тонкими линиями межсоединений. Широко применяются фотошаблоны из хромированного стекла. Оптика для проекционного изображения может изотропно изменять размеры изображения по осям X и Y в целях компенсации увеличения или уменьшения подложки. Источник света очень интенсивный, что позволяет получить приемлемое время облучения при низкой фоточувствительности используемых резистов с высокой разрешающей способностью.

Офсетная печать

Офсетная печать проводящей пастой упоминалась выше [8]. Результаты усилий консорциума в разработке метода офсетной печати резиста типа «print-and-etch» были представлены на выставке Productronica-2003. В этой разработке участвовали научно-исследовательские институты, университеты, поставщики и производители. Имеются два варианта технологии. В основе одного лежит

односторонняя офсетная печать плат на оборудовании MAN Roland 200, а другой представляет собой процесс двусторонней печати типа «reel-to-reel» (с катушки на катушку) (тип DICO Web), с помощью которого можно обрабатывать примерно 2000 заготовок в час. На печатающий барабан лазером наносится изображение, которое впоследствии можно менять, подобно CD-RW.

Литература

1. Karl H. Dietz. Fine Lines in High Yields (Part CV): Laser Direct Imaging Update // CircuiTree. June 2004.
2. Karl H. Dietz. Fine Lines in High Yields (Part LXXIII): Ink-Jet Applications in Electronics // CircuiTree. October 2001.
3. Christophe Vaucher. The Sharper Image: Current Alternatives to Direct Imaging/Patterning (Part II) // CircuiTree. July 2001.
4. George Gregoire. Innovative Uses for Imprinted, U-Shaped PWB Traces & Microvias. IPC Expo '98. Long Beach, CA, USA.
5. US Patent 4,606,787 to P. Pellegrino.
6. D. J. Meier, J. Kickelhain. Laser Technologies for HDI Applications — New Structuring and Via Processing. Proc. ECWC (9). October 2002. Cologne, Germany.
7. Ultramid T als Traeger fuer MID-Schaltungen bei Laser-Direkt-Strukturierung // Production von Leiterplatten und Systemen. 2004. № 9.
8. Additive Circuit Processes // RT Circuits: Printed Circuit Europe. 3rd Quarter 2001.
9. INVINT (www.invint.com).
10. H. K. Roth et al. Laser Recording of Circuit Structures from Conducting Polymers in

Технология

■ Схемы, полученные электроосаждением меди

■ Сравнение традиционных и новых технологий



Рис. 6. Схемы ПТ, полученные с помощью технологии офсетной литографии (источник: RT Circuits)

11. Yoshiko Hara. Inkjet wiring advances 'desktop factory' goal // EE Times. 11/8/2004.
12. Market needs and LDI technological improvements drive further utilization of LDI (Orbotech). TPCA Proc. Oct.-Nov. 2003. Taipei, Taiwan.
13. http://www.pentax.co.jp/japan/products/system/directimager/index_2080.html
14. www.cmslasermarking.com
15. www.anvik.com
16. New System Company (www.new-system.com).
17. Productronica. Product Launches // Printed Circuit Europe. 1st Quarter 2000.
18. Jetmask Ltd. (www.jetmask.com).
19. The Inkjet Legend // Printed Circuit Europe. 1st Quarter 2001.
20. Printar (www.printar.com).
21. MicroFab Technologies (www.microfab.com).