

# Лазерные разработки расширяют возможности LDI

**Прямое лазерное формирование изображений (Laser Direct Imaging — LDI) в производстве печатных плат позволяет получить более точный рисунок, чем традиционный метод контактной печати с фотошаблона, и обеспечивает существенную экономию за счет снижения стоимости пленки и времени выполнения операций. Однако одно время развитие LDI-технологии в производстве печатных плат сдерживалось из-за повышенных издержек и неоправданной необходимости применения газовых лазеров с высокой мощностью рассеивания и необходимостью использования водяной системы охлаждения. Теперь LDI-системы используют твердотельные лазеры, не имеющие этих недостатков и отличающиеся необходимой надежностью в работе. Эта статья представляет собой описание LDI-технологии в разрезе возможностей, открывшихся благодаря появлению новых твердотельных лазеров.**

Шри Венкат

## Особенности технологии LDI

При прямом создании изображения (LDI) лазер используется для того, чтобы сформировать рисунок непосредственно на фоторезисте, покрывающем заготовку печатной платы (ПП). Тем самым исключается необходимость использования традиционных при изготовлении ПП фотошаблонов. В самой обычной реализации LDI управляющая САМ-система<sup>1</sup> используется для того, чтобы модулировать сфокусированный лазерный луч, который в свою очередь создает растр на поверхности платы. Желаемый рисунок создается построчно, аналогично тому, как изображение формируется на экране дисплея (рис. 1).

После того как формирование изображения завершено на одной стороне заготовки, плата переворачивается, и на второй стороне аналогичным способом формируется рисунок. Доступные в настоящее время LDI-системы этого типа могут прорисовать заготовки шириной в 24 дюйма (610 мм) за один проход, исключая необходимость в любом типе пошагового прохождения изображения или сшивания фрагментов в один формат. Эти системы обычно используют газовый или твердотельный лазер, который выделяет несколько Ватт мощности в ультрафиолетовом диапазоне.

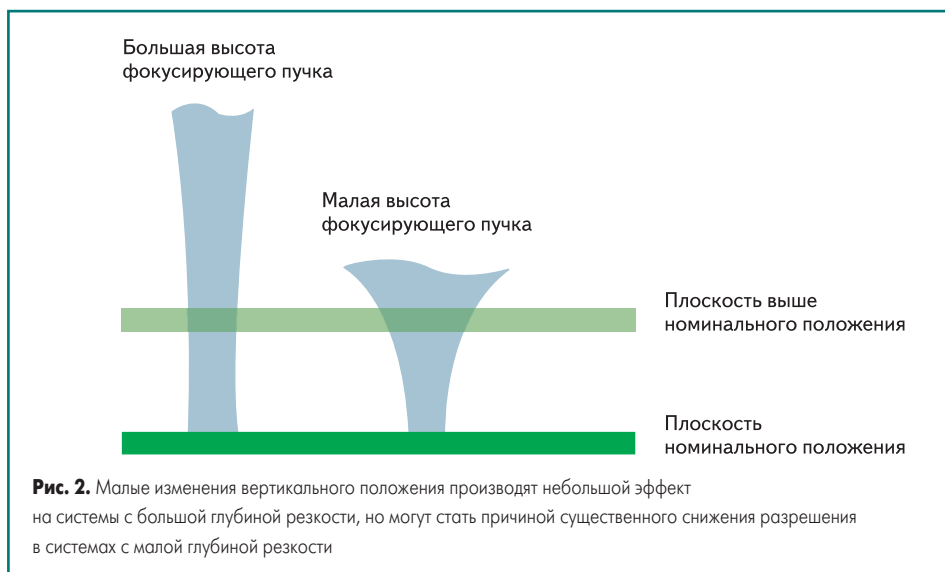
Как альтернатива прямого создания изображения существует метод, основанный на использовании объемного светового модулятора (spatial light modulator — SLM). Это устройство, которое создает некую форму пространственно меняющейся модуляции луча света. Метод SLM широко используется в проекторах и проекционном телевидении. В этом случае САМ-система через внешний интер-

фейс управляет SLM, который отображает часть изображения, максимальная ширина которого обычно составляет 300 мм. SLM освещается длинным лазерным лучом и отраженный рисунок проецируется на поверхность ПП. После этого основание сдвигается на определенный шаг, а на SLM выводится следующая часть изображения. В этом методе полное изображение ПП поэтапно сшивается из фрагментов. В большинстве SLM не используется ультрафиолетовый свет, поэтому эти системы обычно основаны на полупроводниковых лазерах с излучением в фиолетовой части видимого спектра (длиной волны 405 нм).

Системы LDI, основанные на растровом сканировании, доступны почти для всех нынешних установок. Исторически растровое формирование изображения по LDI-технологии было впервые разработано в 1990 году, задолго до того, как появился SLM, в результате чего эта технология хорошо закрепилась на рынке.



<sup>1</sup> CAM — Computer Aided Management



Однако существует ряд технологических причин, из-за которых установки растрового формирования изображения продолжают доминировать на рынке LDI. Первая и самая главная — эта технология основана на лазерах, действующих примерно в том же ультрафиолетовом спектре, что и традиционная контактная печать, и это допускает использование стандартных фоторезистов и обработку их в условиях неактивного освещения. А SLM требует особых резистов.

Еще одна проблема SLM — низкая оптическая эффективность. Обычно поверхности фоторезиста достигает менее 10% света от лазера. Оптическая же эффективность для растрового формирования изображения — 60%. Уменьшение оптической эффективности требует использования фоторезистов с существенно более высокой чувствительностью или компенсации низкой интенсивности освещения длительной экспозицией.

Системы, основанные на SLM, теоретически должны обеспечивать более высокое пространственное разрешение, чем растровые. К сожалению, в реальных условиях высокого разрешения довольно трудно достичь. Дело в том, что типовая оптическая система, необходимая для SLM-систем, имеет сравнительно небольшую глубину резкости — примерно  $\pm 40$  мкм. Это означает, что любое вертикальное отклонение заготовки платы из-за изгиба или локальных ударов может нарушить фокусировку изображения и, таким образом, привести к снижению разрешающей способности оборудования (рис. 2).

Для сравнения: оптика, используемая в растровом сканировании, имеет гораздо большую глубину резкости, которая обычно достигает  $\pm 300$  мкм. Это с избытком перекрывает диапазон деформации плоскости практически любой заготовки.

Несмотря на эти проблемы, технология SLM довольно широко используется благодаря высокой производительности. С высокой долей уверенности можно утверждать, что, как только первая установка, основанная на SLM-отображении, была разработана, довольно легко можно было объединить несколько устройств вместе, чтобы оптимизи-

ровать работу установки для практического использования под конкретное производство, будь то быстрая производительность или высокое разрешение. Это бы привело к возможности производить широкую номенклатуру изделий, работая в многочисленных сегментах рынка с минимальными затратами на проектирование. Тем не менее, поскольку LDI-аппаратура на базе SLM в настоящее время составляет лишь небольшую часть рынка, остальная часть статьи ограничена описанием аппаратуры растрового формирования изображения.

### Практические аспекты использования LDI

В сравнении с традиционной контактной печатью в производстве печатных плат LDI имеет как преимущества, так и недостатки. В результате важно понять все характеристики LDI, чтобы определить, является ли это правильным решением в специфических условиях какого-либо производства.

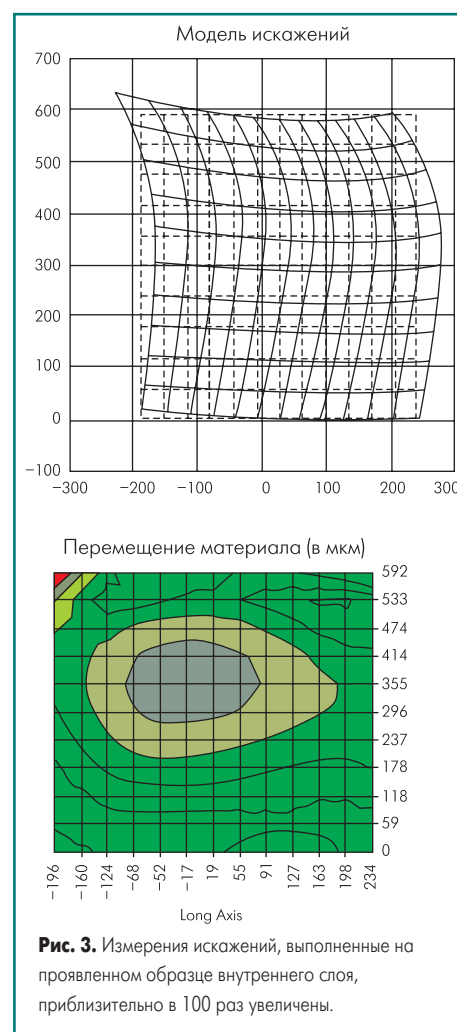
Самые очевидные преимущества LDI — экономное время и отсутствие расходов на создание, использование, обработку и хранение фотошаблонов. Кроме того, LDI избавлено от любых проблем, связанных с фотопленкой, ее хранением и дефектами. Методика LDI обеспечивает уникальную четкость и позволяет увеличить процент выхода годных изделий.

LDI также обеспечивает более точное совмещение, чем методы контактной печати, и благодаря этому позволяет производить большую номенклатуру плат самой различной сложности и классов точности. При контактной печати искажения связаны с изменением размеров фотошаблонов или заготовки платы. Эти изменения происходят потому, что материалы, используемые для маски и платы (такие как FR4 и Тефлон), изменяют свои линейные размеры из-за влажности и температуры (которые поддерживаются в типичной для производства среде в пределах  $\pm 2$  °C и  $\pm 5\%$  относительной влажности). Кроме того, изменения, как в пленочной основе фотошаблонов, так и в основаниях ПП, обычно носят анизотропный харак-

тер. В результате для компенсации ошибки невозможно применить какой-либо один коэффициент масштабирования к топологическому чертежу (рис. 3).

Технология LDI помогает избежать всех этих проблем, так как не использует фотошаблонов, и размеры рисунка, сделанного с помощью лазера, не зависят от внешних условий. Кроме того, большая гибкость, присущая LDI, позволяет при необходимости изменять размеры, ориентацию и формы элементов рисунка. Чтобы определить, какие изменения необходимы, система отображения LDI измеряет точные положения реперных знаков на заготовке и затем использует полученные измерения для того, чтобы с высокой точностью вычислить, каким образом рисунок должен быть изменен, для того чтобы оптимизировать совмещение для этого конкретного образца или для всей партии. Как правило, процесс корректировки включает изменения по осям X и Y и вращение. Также имеется возможность наклонить или деформировать рисунок, хотя на практике такие преобразования используются довольно редко. В конечном счете, в производственных условиях совмещение двух сторон с точностью до 24 мкм может быть достигнуто даже на заготовке размерами 610×812 мм.

Способность обеспечивать хорошую точность совмещения особенно важна для производства ПП с высокими классами точности. Как правило, когда разработчик ПП имеет



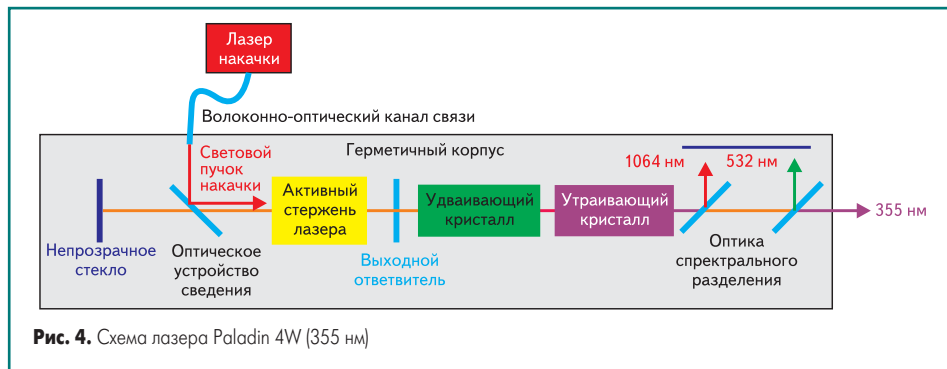


Рис. 4. Схема лазера Paladin 4W (355 нм)

дело с жесткими нормами проектирования, он использует меньший размер заготовки, что позволяет свести к минимуму линейные погрешности, о которых писалось выше. С одной стороны, этот метод способствует увеличению выхода годных, но с другой — отрицательно сказывается на производительности, так как резко уменьшает количество ПП, мультиплицированных на заготовке. Опять же, как следствие этого — повышение производственных издержек. LDI, напротив, устраняет необходимость в использовании заготовок малых размеров.

Один из недостатков LDI состоит в невозможности достичь такой же высокой разрешающей способности, что и при контактной печати. Современные LDI-системы могут воспроизвести минимальный размер, равный 25 мкм, в отличие от 15 мкм у контактной печати. Этот недостаток делает невозможным использование LDI для производства тонких линий, например, применительно для Flip-Chip-компонентов<sup>2</sup>. Однако это препятствие не является непреодолимым, и разработка систем, где эта проблема устранена, уже с успехом ведется.

Для большинства изготовителей ПП есть все-таки один действительно существенный недостаток LDI — это производительность процесса, которая составляет порядка 80–90 заготовок в час (как для внутренних, так и для внешних слоев). В то же время технология контактной печати позволяет достичь порядка 200–300 заготовок в час для внутренних слоев, и 90–120 заготовок в час для внешних слоев. LDI-системы если и смогут достичь такого результата, то только при использовании сверхчувствительных сухих пленочных фоторезистов (СПФ) (10 мДж/см<sup>2</sup>), которые, естественно, намного дороже, чем обычные СПФ.

### Лазеры в оборудовании LDI

Производительность LDI-системы может быть улучшена путем увеличения мощности лазера, предполагая, что все остальные параметры не изменяются. В прошлом увеличение мощности было практически недоступно, так как для этого требовались большие денежные затраты, но на данный момент ситуация коренным образом изменилась.

Ранее в основе LDI-систем были аргоновые лазеры. В некоторых случаях высоко-

качественные LDI-установки использовали 4-ваттный аргоновый лазер, действующий в диапазоне длин волн 351–364 нм. Такой лазер использует ионы аргона в газовом состоянии, как излучающую когерентный свет среду. Газ находится в керамической плазменной трубе. Этот тип лазера не только обеспечивает необходимую длину волны излучения, но и обладает необходимым для успешной работы LDI качеством излучения.

Главный недостаток аргонового лазера — это проблемы, связанные с его эксплуатацией, а также большие начальные затраты по монтажу и настройке системы. Немало возникает проблем и с самой работой лазера и его обслуживанием, которое стоит довольно дорого. Заметим, что 4-ваттный аргоновый лазер потребляет от трехфазной сети 480 В значительную мощность, требующую непрерывной подачи охлаждающей воды со скоростью около 20–50 литров в минуту. Также необходим непрерывный поток сухого азота (5–10 литров в час), используемый для того, чтобы держать трассу лазерного луча свободной от загрязнений.

Среднее время наработки на отказ плазменной трубы для лазера такого типа — около 3000 часов. Оптическая система в LDI-установке требует настройки после замены трубы, так как лазерный луч не будет выходить из трубы точно так же, как выходил из нее ранее. В дополнение к затратам на вспомогательное оборудование для LDI и собственно техпроцесс, приходится учитывать время простоя в периоды замены трубы и юстировки оптики, что тоже обходится довольно дорого.

Чтобы соответствовать требованиям LDI-систем, в частности в плане обеспечения надежности в сочетании с приемлемыми ценами, изготовители лазеров, например Coherent, разработали альтернативный твердотельный лазер. Эти лазеры, например Coherent Paladin, используют стержень Nd:YVO<sub>4</sub> (стеклоподобное вещество) с оптической накачкой диодными лазерами через спаренные оптоволоконные линии. Близкое инфракрасное излучение (1064 нм) Nd:YVO<sub>4</sub>-лазера преобразуется в ультрафиолетовое с длиной волны 355 нм при помощи использования гармонических кристаллов (рис. 4).

Такая конфигурация позволяет получить на выходе излучение отличного качества, с очень хорошей сходимостью, стабильной мощностью и хорошей шумовой характеристикой. Лазер Coherent Paladin собирается в стерильных условиях, затем герметически

запечатывается, чтобы исключить возможность попадания загрязняющих веществ и потребность в регулярной поставке сухого азота. В дополнение к увеличению срока работоспособности, это также позволяет работать лазеру в широком диапазоне температур и при колебаниях влажности, а также обеспечивает возможность работы в жестких промышленных условиях без вмешательства операторов.

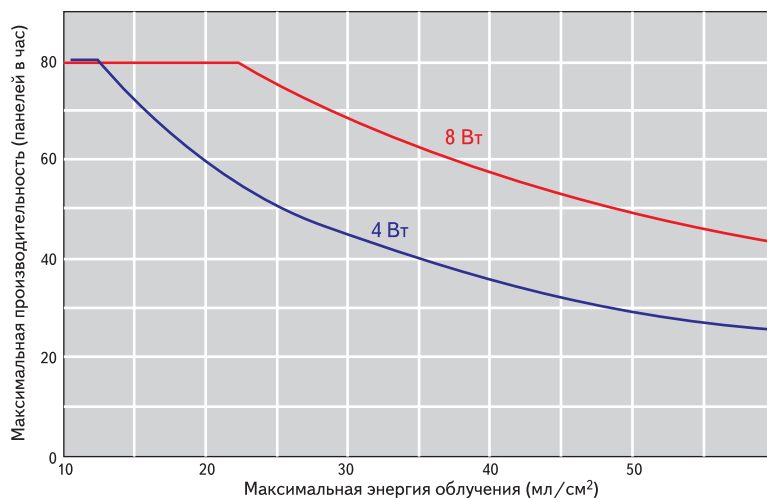
Переход на газовые лазеры в стеклянной трубке имеет значительные преимущества относительно твердотельных лазеров. Первое — общая надежность лазера существенно возрастает, значительно уменьшается и время простоя. Необходимый компонент для работы лазера — диод накачки — имеет наработку на отказ более 10 000 часов. Второе преимущество связано с тем, что оптоволоконные линии накачки лазерного стержня спарены, их можно быстро заменить, не прерывая работы лазерной головки, и нет нужды в любой оптической юстировке. Третье — гармонический кристалл генератора тоже требует замены в среднем только после 15 000 часов работы, что довольно много, причем замену кристалла выполняет изготовитель.

Высокая эффективность твердотельных лазеров снизила потребляемую ими мощность, что привело к значительному сокращению рассеиваемой лазером мощности. Это позволяет подключать лазер Paladin к стандартной сети 110/220 В, а для охлаждения использовать небольшой охладитель с замкнутым водооборотом, который устраняет необходимость в большом потреблении воды. Потребляемая мощность Paladin — 4 кВт/час, для сравнения: аргоновый лазер потребляет около 60 кВт/час. По данным разработчика LDI-системы Orbotech (Yavne, Израиль), такая существенная разница позволяет сэкономить на электричестве до \$30 000 в год (исходя из 40-часовой недели односменной работы).

Первые LDI-системы, основанные на твердотельном лазере, использовали образцы мощностью 4 Вт. Такой лазер заменял прежде используемые четырехваттные аргоновые лазеры, при которых проявились преимущества, описанные выше, но в то время не обращалось внимание на небольшую производительность системы и на потребность в сверхчувствительных фоторезисторах. Однако, существует большое преимущество твердотельной технологии, используемой в Paladin — это масштабируемость, и, несмотря на некоторые возникавшие проблемы, в 2004 году уже был использован лазер мощностью 8 Вт. Очевидно, такой путь совершенствования был бы недоступен при использовании аргонового лазера.

С твердотельным лазером мощностью 8 Вт стало возможным постепенно продвигаться к менее дорогому пленочному фоторезисту (20 мДж/см<sup>2</sup>), при этом поддерживая производительность около 80 плат/час. Для увеличения производительности поочередно может использоваться более чувствительный фоторезист.

<sup>2</sup> Flip-Chip — компоненты, монтируемые методом перевернутого кристалла



**Рис. 5.** LDI-система на базе 8 Вт лазера может достигнуть производительности до 80 плат/час с 20 мДж/см² фоторезистом

График на рис. 5 отображает достижения в техпроцессе как функцию чувствительности фоторезиста для лазеров мощностью 8 Вт и 4 Вт.

### Заключение

Подводя итог сказанному, отметим, что, учитывая технологические возможности и затраты на эксплуатацию современных LDI-систем, отчетливо проявляются преимущества при использовании технологии LDI в некоторых специфических областях. Например, LDI найдут свое применение в производстве

плат с точной системой совмещения, в ситуациях, где малый срок изготовления платы не является критическим, или для короткого рабочего прогона системы (на тех производствах, где создание топологического чертежа, а точнее расходы на его создание — важный пункт). Прогресс в лазерных технологиях не стоит на месте, и при современных тенденциях можно прогнозировать, что LDI-системы прочно займут свою рыночную нишу. Это, в конечном счете, может послужить вызовом засилью контактной печати и базовым технологиям производства печатных плат.