

# ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНЫЙ ЛАЗЕРНЫЙ ФОТОПЛОТТЕР ДЛЯ ФОТОШАБЛОНОВ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ

С.Баев, В.Бессмельцев, В.Слуев

Технологическое оборудование для изготовления большеформатных прецизионных фотооригиналов печатных плат — неперенный атрибут производства изделий электронной техники. До недавнего времени отечественным производителям печатных плат приходилось выбирать между чрезвычайно дорогими высокоточными зарубежными устройствами и относительно дешевыми, но обладающими низкой точностью прорисовки, фотонаборными автоматами. Ситуация для отечественного производителя изменилась к лучшему с появлением лазерных фотоплоттеров серии "Ромб-Vis-ФШ".

## СОВРЕМЕННОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ВЫВОДА ФОТОФОРМ

Сегодня на рынке оборудования для вывода прецизионных фотоформ наиболее распространены универсальные лазерные графические устройства с растровым способом формирования изображений. Производители выпускают широкий спектр подобных изделий как для печатных плат, так и для вывода полиграфических фотоформ. Однако из-за высокой стоимости предприятиям России и СНГ доступны, как правило, модели низшей ценовой категории, предназначенные для применения в полиграфии. Недостаточная точность механических узлов сканирования лазерного луча и деформация пленки в результате протяжки рулонных фотоматериалов в устройствах данного типа приводят к геометрическим погрешностям записываемых изображений, достигающим 100–200 мкм на размере выводимого кадра [1]. Это ограничивает их применение изготовлением фотошаблонов для плат 2–3 класса точности, поскольку для современных изделий с характерными размерами топологии порядка 100 мкм допустимая погрешность геометрических размеров фотошаблонов — не выше 15–20 мкм.

Минимальную погрешность позиционирования записывающего лазерного луча обеспечивает наиболее точный на сегодня механизм сканирования с внешним барабаном. В устройствах с таким способом развертки изображение переносится на листовые фотоматериалы с высокостабильной ПЭТФ-основой увеличенной толщины (0,18 мм), минимизирующей погрешности, связанные с механической и термической деформацией. Прецизионные лазерные фотоплоттеры данного типа выпускают фирмы ECRM, Gerber Scientific (США) и Duplepp Screen (Япония). Их стоимость превышает 100 тыс. долларов.

В России работы по применению лазерных технологий для изготовления фотошаблонов печатных плат начались во второй половине 70-х годов практически одновременно в НИИ "Полус" (Москва) и Институте автоматики и электрометрии (ИАиЭ) СО РАН (Новосибирск). Основное внимание уделялось исследованию прямых лазерных способов получения фотооригиналов, а также прямых способов изготовления металлических проводящих слоев печатных плат на бессерьбряных, непрозрачных материалах. Формирование изображения осуществлялось методами, основанными на эффектах теплового воздействия лазерного излучения CO<sub>2</sub>- и YAG-лазеров [2, 3].

Однако несомненные преимущества прямых, не требующих проявления и закрепления, методов изготовления фотошаблонов сопровождаются рядом существенных недостатков. Важнейший из них заключается в том, что из-за низкой чувствительности материалов к лазерной тепловой записи существенно возрастает время вывода большеформатных форм — около часа для формата 500х600 мм<sup>2</sup> при разрешении 2000 точек/дюйм и мощности лазера более 10 Вт. Хотя размер записываемого пятна в устройствах на основе YAG:Nd-лазера менее 20 мкм, эти лазеры дороги (15–20 тыс. долл.), требуют много электроэнергии для питания и воды для охлаждения, что значительно увеличивает стоимость плоттера и его эксплуатационные расходы.

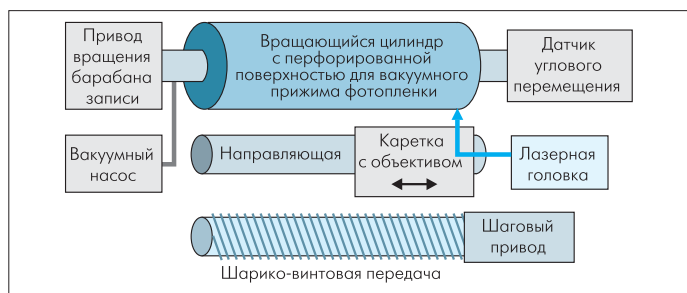
В зарубежных разработках последних лет использованы методы тепловой записи на основе миниатюрных высокоэффективных полупроводниковых лазеров с мощностью свыше 1 Вт. Такие источники позволили повысить производительность путем распараллеливания процесса записи — одновременно работают до 64 оптических головок или применяются лазерные головки с многоканальными оптическими затворами. Но стоят подобные устройства также значительно дороже 100 тыс. долл. Кроме того, отечественные расходные материалы для тепловой записи серийно не выпускаются, а опытные образцы стоят дороже импортных серебросодержащих фотопленок. На мировом рынке пленочные материалы для лазерной тепловой записи также распространены мало, дороги и массово в Россию не поставляются.

С другой стороны, основная и наиболее распространенная во всем мире технология изготовления фотошаблонов — фотозапись. Лазерные источники излучения в современных фотопостроителях позволяют использовать фототехнические материалы со светочувствительностью 1–10 единиц ГОСТ, малым содержанием серебра и разрешающей способностью более 1000 лин/мм. При этом для записи кадра площадью 1 м<sup>2</sup> за 1 минуту достаточно лазерного источника с 10–20 мкм записывающим пятном мощностью не более 1 мВт. Лазеры видимого и ближнего ИК-диапазона такой мощности стоят порядка 300 долларов, что существенно удешевляет фотопостроители.

Для лазерной фотозаписи разработана широкая гамма пленок с максимальной оптической плотностью более 5 D при оптической плотности вуали не более 0,04 (последняя определяется коэффициентом пропускания ПЭТФ-основы). Высокий коэффициент контрастности — более 10 — обеспечивает хорошую резкость края (менее 2 мкм) и уменьшает ошибки записи из-за нестабильности мощности лазерного излучения и режима обработки. Обработка фототехнических материалов сократилась до 1 минуты, а проявочные автоматы сделали процедуру обработки пленки простой и надежной. Благодаря селективной спектральной чувствительности современные фототехнические пленки, чувствительные к красному участку спектра, можно экспонировать и обрабатывать при сине-зеленом освещении, а чувствительные к сине-зеленому свету — при красном.

## ЛАЗЕРНЫЙ ФОТОПЛОТТЕР "РОМБ-VIS-ФШ"

В лазерном растровом фотоплоттере "Ромб-Vis-ФШ", разработанном в ИАиЭ СО РАН, применена технология лазерной фотозаписи. Обес-



**Рис. 1. Структура опико-механической части фотоплоттера "Ромб-Vis-ФШ"**

печивая необходимые технические характеристики фотошаблонов, она позволяет применять легкодоступные и дешевые фототехнические пленки ведущих мировых производителей (Agfa, Kodak, Fuji), широко представленные в России.

Структура **опико-механической части** фотоплоттера представлена на рис. 1. Листовая фотопленка крепится на поверхности вращающегося цилиндра за счет вакуумирования, обеспечивающего ее точную фиксацию. Линейное перемещение поверхности цилиндра при вращении измеряется с точностью 2,5 мкм с помощью опико-электронного датчика углового перемещения, механически соединенного с осью вращения барабана.

Вдоль образующей цилиндра по направляющей перемещается каретка с фокусирующим короткофокусным объективом, управляемая шарико-винтовой парой (ШВП) и шаговым двигателем (ШД). Движением объектива вдоль опической оси также управляет шаговый привод. Дискретность перемещения каретки составляет 5 мкм, точность позиционирования — не хуже 2 мкм, накопленная ошибка не превышает 15 мкм на 600 мм.

Источник излучения базовой модели — He-Ne-лазер малой мощности (2 мВт). Отечественные излучатели такого типа по своим параметрам не уступают западным, сравнительно дешевы и экономичны в эксплуатации. Их ресурс превышает 10000 часов. Ключевой элемент опической схемы лазерного фотоплоттера — акустооптический модулятор-дефлектор (АОМД) на основе кристалла парателлуриата ( $\text{TeO}_2$ ). Многочастотное управление АОМД позволяет сформировать на его выходе многолучевую растр независимо управляемых лазерных пучков. Опической схемой многолучевой растр направляется в объектив и фокусируется на поверхность фотоматериала на барабане. За один оборот барабана записывается столько строк изображения, сколько пучков в растре. Так, 16 лучей на выходе модулятора за один оборот цилиндра экспонируют полосу шириной 160 мкм (при разрешении 2540 точек на дюйм). Технические же характеристики АОМД позволяют получить на его выходе до 32 пучков. Малая скорость вращения цилиндра — до 600 об/мин — снижает уровень механических вибраций. Однако распараллеливание записи делает скорость экспонирования высокой. Так, вывод кадра максимального формата (500x600 мм<sup>2</sup>) в старт-стопном режиме перемещения головки записи (запись ведется только при неподвижной головке) при разрешении 2540 т/дюйм составляет 12 минут. В режиме спиральной развертки максимальный формат выводится за 6 минут.

Опический блок записи выполнен в виде отдельного модуля, поэтому заказчик может выбрать устройство с наиболее подходящим для используемых фотоматериалов источником лазерного излучения: He-Ne- или полупроводниковый лазер для красной области спектра; твердотельный лазер с полупроводниковой накачкой и удвоением частоты для зеленой; аргоновый или полупроводниковый лазеры для сине-фиолетовой.

Фотоплоттер работает с разрешающей способностью 1270, 2540 и 5080 т/дюйм. Размер пятна лазерного луча — 30 мкм для 1270 т/дюйм

и 15 мкм для 2540 и 5080 т/дюйм. Опическая система программно настраивается на пленки различной толщины с помощью записи тестового изображения.

Время обработки экспонированной пленки даже в ручном режиме, без проявочного автомата, не превышает 2 мин, соответственно полный цикл запись-обработка — не более 15 минут.

Для изготовления фотошаблонов 2–3 класса точности пригодна рулонная фотопленка толщиной 0,1 мм, используемая для вывода полиграфических фотооригиналов. Для удобства работы с ней лазерный фотоплоттер, по желанию заказчика, может быть оснащен кассетой с механизмом форматной отрезки. В стандартном исполнении у фотоплоттера нет полной светозащиты барабана записи, поэтому рабочее помещение должно быть изолировано от внешнего света и оборудовано источниками рассеянного неактивного освещения.

**Электроника управления** лазерным фотоплоттером выполнена в виде распределенной системы с автономными блоками управления исполнительными механизмами и сбора данных с датчиков на основе микроконтроллеров (рис. 2). Электронный блок подготовки данных — процессор растривания изображений (RIP) — реализован на платформе IBM-совместимого компьютера с ОЗУ не менее 64 Мбайт. Управляющий компьютер сопрягается с фотоплоттером через специальную плату адаптера, установленную на системной шине. Адаптер принимает подготовленные в виде битовой карты данные пакетами по 32 строки и передает их через скоростной последовательный интерфейс (16 Мбит/с) в модуль буферной памяти контроллера плоттера. Этот модуль распаковывает данные и параллельными 16-битными словами, соответствующими элементам 16 строк изображения, передает их на модуль управления АОМД. Основное управляющее устройство фотоплоттера — микроконтроллер с ядром процессора Intel-51. Он задает параметры модулей, управляет передачей данных на драйверы приводов (шагового двигателя шарико-винтовой передачи, привода



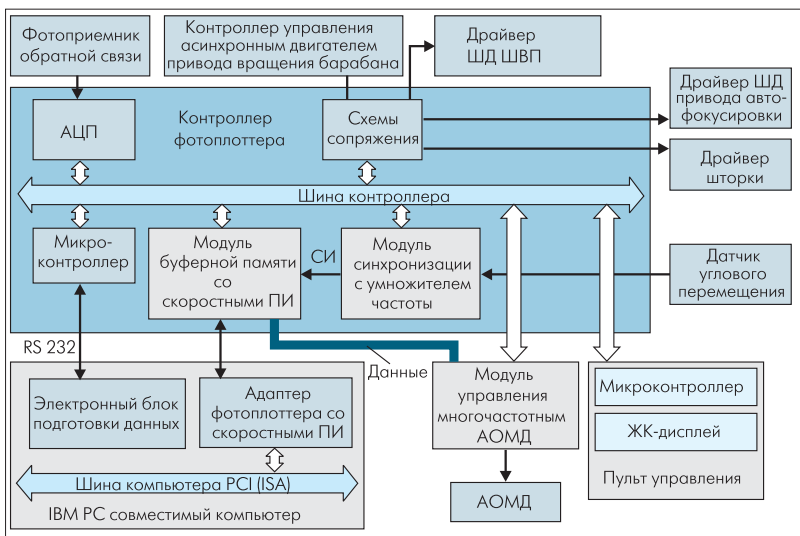


Рис.2. Структура электронных модулей фотоплоттера "Ромб-Vis-ФШ"

автофокусировки, привода шторки), а также управляет контроллером асинхронного двигателя привода вращения цилиндра.

Микроконтроллер принимает также данные от фотоприемника обратной связи, на который в процессе калибровки прибора попадают лазерные лучи с выхода АОМД. Направление лучей – на головку записи или на фотоприемник калибровки – переключает электромеханическая шторка. АЦП преобразует аналоговый сигнал с выхода фотоприемника в 10-разрядный цифровой код. Благодаря этому режим калибровки позволяет выровнять интенсивность излучения в каждом канале с точностью не хуже 1%. Цифровые сигналы управления интенсивностью каждого канала поступают в модуль управления многократным АОМД, где запоминаются и преобразуются в аналоговые сигналы, задающие мощность высокочастотных сигналов управления АОМД. Кроме того, модуль управления АОМД содержит блок быстрой коррекции интенсивности, исправляющий нелинейности АОМД, возникающие из-за особенностей многократного режима. Калибровка предшествует записи каждого кадра фотооригинала.

Внутреннее аппаратно-программное обеспечение контроллера поддерживает два режима движения каретки вдоль оси барабана: спиральный и старт-стопный. Спиральный режим минимизирует время вывода, однако увеличивает погрешности записи. В старт-стопном режиме во время перемещения оптической головки записи не происходит, поэтому точность определяется только ошибками изготовления механических узлов.

Из-за неизбежных погрешностей механической обработки барабан не точно соответствует форме цилиндра с постоянным радиусом, что вызывает малые погрешности, которые необходимо компенсировать. Для этого контроллер поддерживает функцию масштабирования длины строки в пределах 2,5–50 мкм. Уникальная для каждого устройства таблица коэффициентов масштабирования в зависимости от местоположения каретки загружается (или может быть жестко зашита) в начале работы.

Все основные параметры работы системы отображаются на ЖК-панели пульта управления. Пульт позволяет в ручном режиме перемещать записывающую головку в нужную зону цилиндра и изменять фокусное расстояние объектива. В автоматическом режиме все параметры задаются оператором с клавиатуры ПК и загружаются в контроллер из электронного блока подготовки через стандартный порт RS-232.

Описания топологии, созданные с помощью программных средств проектирования, записываются в файлы печати в формате PostScript и по локальной сети передаются в электронный блок подготовки дан-

ных. Данные для вывода на фотопостроитель готовит программный PostScript-интерпретатор, разработанный на основе Freeware GhostScript 2.6.1 и поддерживающий, с некоторыми ограничениями, PostScript Level 2. Растрирование и вывод подготовленной битовой карты файла на устройство происходят одновременно. Пользователь может задать коэффициенты масштабирования отдельно для каждой координаты, что бывает необходимо при работе с носителями разной толщины.

**КАЧЕСТВЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ФОТОШАБЛОНОВ**

Основными характеристиками фотошаблонов, определяющими качество элементов на рабочих слоях печатных плат, являются неровность краев элементов изображения, оптическая плотность вуали и максимальная оптическая плотность экспонированных участков фотооригинала. Сравним фотошаблоны печатных плат, изготовленные на лазерном фотоплоттере "Ромб-Vis-ФШ", с фотошаблонами, полученными способом лазерного гравирования мас-

кирующего слоя на лазерном растровом плоттере с YAG:Nd-лазером и однолучевой схемой записи (рис.3). Образцы фотошаблонов изготовлены при одинаковом шаге записи с разрешением 2540 т/дюйм.

**Качество прорисовки элементов топологии (неровность края).** При растровой фотозаписи изображение формируют непрозрачные круглые точки. Граница элемента изображения в результате наложения круглых непрозрачных точек приобретает вид кривой, состоящей из выпуклых сегментов. Эффект взаимного влияния соседних лучей на экспозицию в промежутках между их центрами уменьшает кривизну сегментов в зонах их стыковки – края элементов изображения становятся гладкими, с неровностью не более 3 мкм (рис.3 а).

При растровой лазерной термозаписи изображение формируют пробельные круглые точки. Наложение пробельных точек создает границу элемента изображения в виде кривой из вогнутых сегментов. Взаимного влияния соседних записывающих пучков, вследствие однолучевой схемы записи и порогового ее характера, не происходит. Соответственно, не изменяется и экспозиция в зоне стыковки соседних строк. Это приводит к характерной регулярной неровности краев элементов изображения (острые "пички", направленные наружу) с периодом, равным разрешающей способности механизма сканирования – 0,01 мм (рис.3 б). Точный перенос изображения с такой неровностью краев на рабочий слой печатной платы может привести к ухудшению ее электрофизических характеристик вследствие возрастания вероятности замыкания соседних элементов топологии или электри-

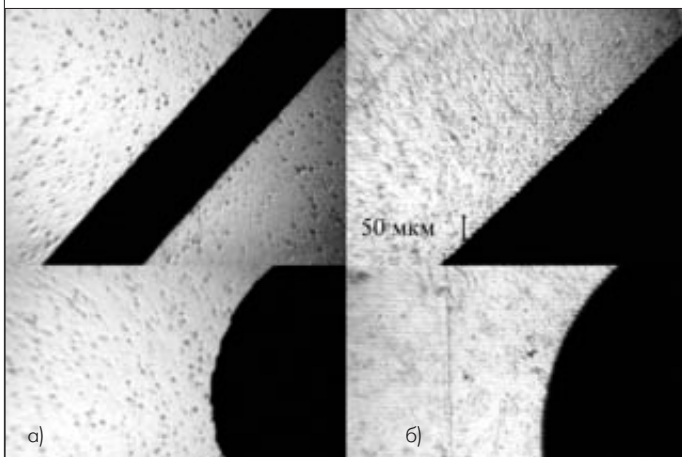


Рис.3. Микрофотографии фрагментов фотошаблонов, изготовленных: а – по фототехнологии, б – методом лазерного гравирования



ческого пробоя из-за локального увеличения напряженности поля в области "пиков".

**Максимальная оптическая плотность и оптическая плотность вуали фотошаблонов.** Как уже отмечалось, для фотошаблонов, изготовленных методом лазерной фотозаписи, максимальная оптическая плотность превышает 5 D, ее значение слабо зависит от малых изменений экспозиции. Оптическая плотность вуали постоянна и практически равна плотности прозрачной основы (0,04 D).

При лазерном гравировании оптическая плотность маскирующего слоя фотошаблонов постоянна и очень высока – более 5 D. Плотность же пробельных элементов (аналог оптической плотности вуали в негативном фотопроцессе) зависит от мощности лазерного излучения. Поскольку ширина гравированной линии прямо пропорциональна мощности лазерного пучка [2], малые изменения экспозиции (на 5–10%) могут привести к существенным изменениям величины вуали. Так, при уменьшении экспозиции на поверхности основы остаются участки маскирующего слоя в виде тонких линий в направлении сканирования (с плотностью маскирующего слоя), что увеличивает вуаль до 1 D и создает опасность переноса дефектов на печатную плату. Для надежного устранения этого эффекта экспозицию увеличивают, по сравнению с пороговой, на величину флуктуаций мощности источника излучения. Чрезмерное же увеличение экспозиции приводит к тому, что вместе с маскирующим покрытием гравировается основа, в результате коэффициент рассеяния фотошаблона возрастает, увеличивая плотность вуали до 0,1–0,5 D. Проникновение рассеянного света за границы теневого изображения приводит к снижению разрешающей способности процесса фотолитографии печатных плат. Повреждение основы в результате гравирования хорошо заметно на рис.3 б в виде периодической модуляции пропускания пробельных участков.

Таким образом, фотошаблоны печатных плат, изготовленные по технологии лазерной растровой фотозаписи на современных фототехнических материалах, обладают более высокими качественными

характеристиками, чем фотошаблоны, полученные лазерным гравированием маскирующих слоев.

Эксплуатация лазерных растровых фотоплоттеров "Ромб-Vis-ФШ" показала, что они при существенно – в 3–5 раз – меньшей стоимости по техническим характеристикам не уступают западным образцам. Их параметры вывода удовлетворяют требованиям современного производственного процесса: формат – 500x600 мм<sup>2</sup>; разрешающая способность – до 5080 точек на дюйм, точность построения изображения 15–20 мкм по всему полю, время вывода полного формата – 12 минут. Лучшие образцы отечественных лазеров, оптоэлектроники, оптики и механики обеспечили низкую, по сравнению с зарубежными аналогами, стоимость устройства, высокую надежность и малые эксплуатационные затраты. Фотоплоттеры этой серии установлены и успешно работают на предприятиях Новосибирска, Москвы, Нижнего Новгорода и других городов.

*Данная разработка выполнена большим коллективом сотрудников ИАиЭ СО РАН. Особенно большой вклад, наряду с авторами статьи, внесли В.В. Вилейко, Л.В. Выдрин, К.К. Смирнов.*

#### ЛИТЕРАТУРА

1. **Топоров С.** Фотошаблоны – на полиграфическом оборудовании. – ЭЛЕКТРОНИКА: НТБ, 2001, №1, с.48.
2. **S.G.Baev, V.P.Bessmeltsev.** Laser Thermographics Technologies for Hardcopy Recording. – Proceedings of SPIE, 1995, v. 2413, p. 304-313.
3. **V.M.Andreev, S.G.Baev, V.P.Bessmeltsev, L.A.Pavlukhina, T.A.Chuprikova.** Laser thermochemical formation of metal conductors on insulating substrates. – Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing, 1990, № 3, p.115–118.
4. **Бесемельцев В.П., Иоффе А.В., Спугев В.А., Смирнов К.К.** Унификация аппаратных и программных средств для лазерных фотопостроителей высокого разрешения. – Автометрия, 1996, №5, с.85–96.