

ОПТИЧЕСКИЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК 681.6-3 : 621.373.8

С. Г. Баев, В. П. Бессмельцев, Л. В. Выдрин, А. И. Жилевский,
И. Г. Максимов

(Новосибирск)

ПРЕЦИЗИОННЫЙ ЛАЗЕРНЫЙ ТЕРМОГРАФИЧЕСКИЙ
ГЕНЕРАТОР ИЗОБРАЖЕНИЙ

Рассматривается растровое устройство вывода синтезированных изображений с термографическим методом регистрации, обеспечивающим безусловную запись на бессеребряные непрозрачные материалы. Устройство построено на основе барабанного сканера. Для записи применен СО₂-лазер с выходной мощностью до 25 Вт. Устройство используется, в частности, при изготовлении высокоточных фотошаблонов больших печатных плат на диазопленке Ф1 методом испарения диасоля. Подробно рассмотрена структура устройства, а также вопросы применяемой технологии записи.

Традиционные технологии формирования изображений для изготовления фотооригиналов печатных плат или печатных форм ориентированы на фотохимические способы воспроизведения и устройства с векторно-масочным экспонированием. Эволюционное развитие аппаратных средств изготовления фотооригиналов привело к переходу с векторных на растровые фотопостроители с лазерным источником записывающего излучения. Это позволило ускорить процесс экспонирования сложных изображений (более 1000 векторов) с нескольких часов до нескольких минут, однако не избавило пользователей от ряда неудобств, связанных с фотохимическим процессом необходимостью дополнительной (обычно «мокрой») обработки после экспонирования, с малым сроком хранения носителей до записи, а также с обязательной защитой носителя от естественного освещения на всех стадиях обработки. Кроме того, процесс усадки подложек, практически неизбежный при жидкостном проявлении, приводит к изменению размеров получаемых фотошаблонов.

Проведенные нами исследования лазерных технологий записи изображений показали, что для задач вывода синтезированных прецизионных изображений со временем вывода в несколько минут наиболее эффективны термографические методы регистрации, обеспечивающие геометрически точную запись высококонтрастных изображений на дешевые бессеребряные носители, не требующие дальнейшей обработки [1—3]. При этом весь процесс вывода идет при естественном освещении в реальном времени, что облегчает процессы контроля и соответственно уменьшает процент брака.

Однако реализация преимуществ лазерной термографии связана с решением ряда специфических задач: создание системы сканирования и управления лазерным лучом инфракрасного диапазона большой (> 10 Вт) мощности при малом (25 мкм) элементе записи на большой (600 × 600 мм) поверхности носителя, обеспечение оптимальных технологических режимов записи при взрывном характере реакции с выбросом продуктов реакции из зоны записи, практическое отсутствие термочувствительных сред, регистрирующих полутоновые изображения, а также

необходимость адаптации термографических методов формирования фотошаблонов для типового производства печатных плат или форм.

В настоящей статье представлено разработанное в ИАиЭ СО АН СССР термографическое устройство — лазерный растровый генератор изображений (ЛГИ) «РОМБ ФШ» на основе CO₂-лазера с длиной волны излучения $\lambda = 10,6$ мкм и мощностью непрерывного излучения 25 Вт, предназначенное для прецизионного вывода фотошаблонов.

Функциональная схема устройства представлена на рис. 1. Устройство состоит из оптико-механического блока и управляющего электронного блока. Оптико-механический блок содержит развертывающий механизм с вращающимся цилиндром с укрепленным на нем термочувствительным материалом (развертка по оси X) и шаговой протяжкой оптической головки (ось Y).

Основной недостаток этого типа развертки — использование носителей на гибких подложках. Однако безусловность термографического процесса позволяет использовать практически любые виды полимерных подложек, причем стоимость носителей на гибких подложках существенно ниже, чем на жестких, например на стекле. В то же время механизм развертки при высоких точностных характеристиках существенно проще, чем в случае систем с плоским полем записи, ориентированных на жесткие носители, при этом появляется возможность использования короткофокусного объектива записи, что очень важно для инфракрасного диапазона.

Для определения значения X-координаты на оси цилиндра записи установлен оптический датчик синхроимпульсов с меткой начала оборота. Датчик вырабатывает синхроимпульс при повороте барабана на 1,8° (12 000 на оборот) с угловой ошибкой 10". Регистрирующий материал крепится на цилиндре специальными зажимами и притягивается к поверхности за счет откачки воздуха из внутреннего объема цилиндра, имеющего перфорационные отверстия на поверхности установки пленки.

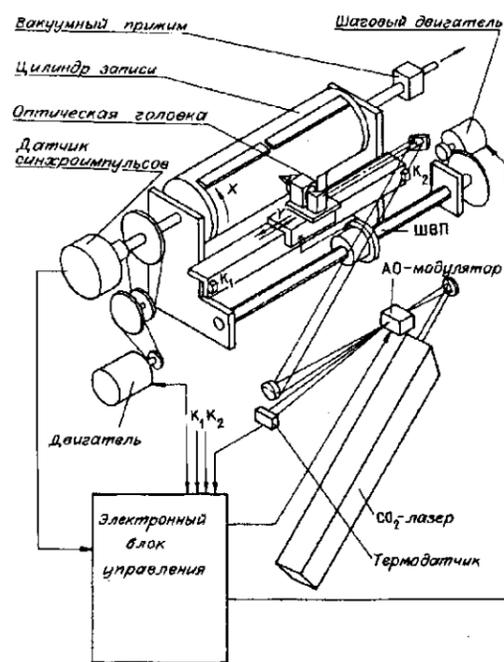


Рис. 1

Точность изготовления цилиндра ~ 15 мкм на всей поверхности. Оптическая головка закреплена на подвижной каретке. Каретка перемещается вдоль стального угольника с плоскими направляющими поверхностями на аэростатических опорах, обеспечивающими точность ± 2 мкм. Каретка соединена с гайкой точной шариковинтовой пары (ШВП). Винт ШВП вращается шаговым двигателем ДШИ-200 через безлюфтовую зубчатую пару с передаточным числом 1 : 5. Этот механизм обеспечивает перемещение оптической головки с дискретностью 5 мкм, ошибкой на шаг 0,5 мкм, накопленной ошибкой 15 мкм на 600 мм. Крайние положения оптической головки идентифицируются концевыми выключателями К1, К2.

Регистрация информации производится построчно при неподвижной оптической головке (старт-стопный режим). Перемещение головки на следующую строку происходит в период нахождения ее в технологической зоне барабана, запрещенной для записи.

Оптическая головка содержит плоское зеркало и германиевый объектив, фокусирующий излучение мощного СО₂-лазера (ЛГ-25Б) на поверхность регистрирующего материала. На головке установлены узел воздушного охлаждения выходной линзы объектива и узел откачки продуктов, выделяющихся при термографических реакциях записи (например, при записи испарением поверхностного маскирующего слоя). Для модуляции лазерного излучения используется акустооптический модулятор (АОМ) МЛ-206. Оптическая схема формирования пучка и согласования с апертурой АОМ построена на двух сферических и одном плоском зеркалах, что позволило свести к минимуму потери света и облегчило компоновку прибора.

Для записи используется 1-й порядок дифрагированного АОМ лазерного пучка, пучок нулевого порядка направляется на заглушку со встроенным в нее датчиком температуры, что позволяет измерять среднюю мощность лазерного излучения. Показания датчика индицируются на пульте управления устройством.

Управление и контроль состояния лазера и оптико-механических узлов устройства возложены на электронный блок управления (рис. 2), включающий в себя микроЭВМ МС 1212, накопитель на магнитной ленте (НМЛ) или накопитель на гибких магнитных дисках (НГМД), накопитель на жестком диске (НЖМД) типа «Винчестер», контроллер лазерного устройства и модуль буферной памяти (БП). Такой состав (достаточно мощная микроЭВМ в сочетании с НЖМД) позволяет применять широкий класс форм представления исходных данных для регистрируемого изображения и эффективно встраивать устройство в различные типы САПР.

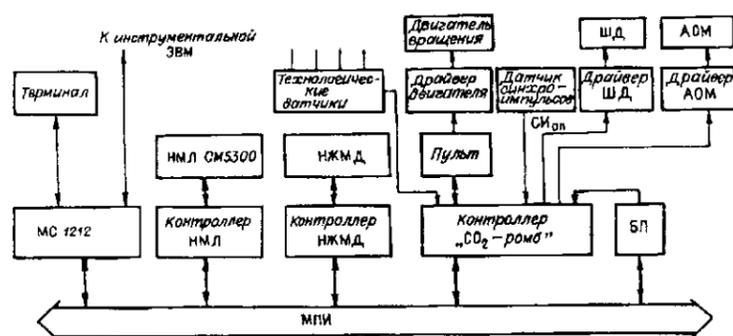


Рис. 2

В широко распространенных САПР печатных плат, СБИС и редакционно-издательских системах выходные данные представлены в векторно-масочном или в векторно-контурном виде, поэтому ряд аппаратных функций лазерного устройства и пакет прикладных программ для него ориентированы на обеспечение максимальной производительности вывода при этих формах представления данных. Реализация стартового режима записи позволила применить асинхронный принцип обмена данными между процессором и устройством, что, в свою очередь, делает устройство не критичным к скорости работы алгоритмов преобразования данных, сказываясь только на скорости вывода. Это обстоятельство позволяет не ограничивать область применения устройства лишь вышеописанными типами САПР. Исходные данные загружаются в память микроЭВМ фрагментами с НМЛ, НГМД или через последовательный канал связи от удаленной САПР в зависимости от общего их объема и

Управление и контроль опико-механическими узлами устройства осуществляются контроллером лазерного устройства совместно с модулем буферной памяти.

Модуль буферной памяти предназначен для временного хранения данных, подготовленных процессором и описывающих строку формируемого изображения (рис. 3). Он позволяет совместить во времени процесс вывода данных для одной строки изображения с подготовкой их для очередной строки и реализует асинхронный режим обмена данными между процессором микроЭВМ и драйвером АОМ, обеспечивая тем самым независимость скоростей процессов подготовки и вывода данных. С целью упрощения структуры модуля такой режим его работы реализован за счет выполнения БП в виде двух буферов (банков) объемом каждый в одну строку полутонового изображения. Этот объем выбран равным $8K \times 16$ бит, что при растре 25 мкм и плотности кодирования в 1 байт на пиксел (для полутоновых изображений) является достаточным для вывода строки изображения длиной 400 мм. По отношению к МПИ оба буфера представляют собой дополнительное ОЗУ с произвольным доступом. Поскольку доступ через МПИ необходим только к тому буферу,

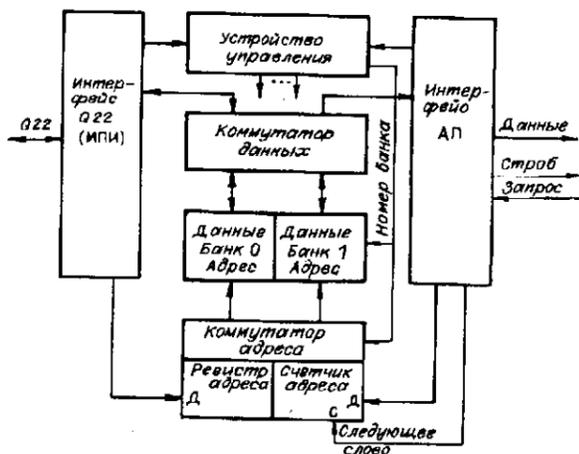


Рис. 3

из которого в данный момент не происходит вывод изображения, то мы ограничились только одним адресным окном для обоих буферов, положение которого может быть выбрано пользователем в диапазоне $0 \div 4$ Мбайт. Вывод данных из БП при записи изображения осуществляется через асинхронный параллельный байтовый порт (АП), по отношению к которому оба буфера — это ОЗУ с последовательным доступом.

Ряд алгоритмов преобразования данных для растрового вывода готовят данные в ОЗУ одновременно для нескольких строк изображения, например, при векторной форме представления входных данных. Однако в этом случае невозможно использовать БП в качестве ОЗУ и загрузку данных в БП для каждой строки необходимо выполнять отдельной процедурой. Для увеличения производительности в подобных случаях в БП предусмотрен контроллер прямого доступа к ОЗУ микроЭВМ.

При кодировании графической информации очень часто используется метод кодирования длин отрезков [7]. Программный способ декодирования в этом случае требует значительных затрат времени. Для ускорения такого преобразования в БП имеются аппаратные средства. Кроме того, поскольку при таком способе кодирования предъявляются повышенные требования к достоверности информации, БП содержит аппаратные средства для контроля четности.

Контроллер лазерного устройства (КУ) содержит блоки: формирования синхроимпульсов (ФСИ), формирования изображения (ФИ), управления шаговым двигателем и интерфейс пульта (рис. 4).

В блоке ФСИ из опорных синхроимпульсов ($СИ_{оп}$), поступающих с выхода оптического датчика угловых перемещений, формируются последовательность синхроимпульсов, связанных с относительной координатой поверхности барабана, частота следования которых соответствует выбранному пользователем шагу дискретизации — 25, 50 или 100 мкм, а также по команде от ЦП строб-сигнал «Строка», разрешающий вывод данных и определяющий размер и положение зоны записи на носителе.

Одна из задач при конструировании этого узла — обеспечение независимости позиций элементов изображения от толщины подложки носителя записи, которая может быть неодинакова для различных типов носителя. Так как информация об X-координате формируется по синхроимпульсам $СИ_{оп}$, то при отклонении толщины носителя Δr от

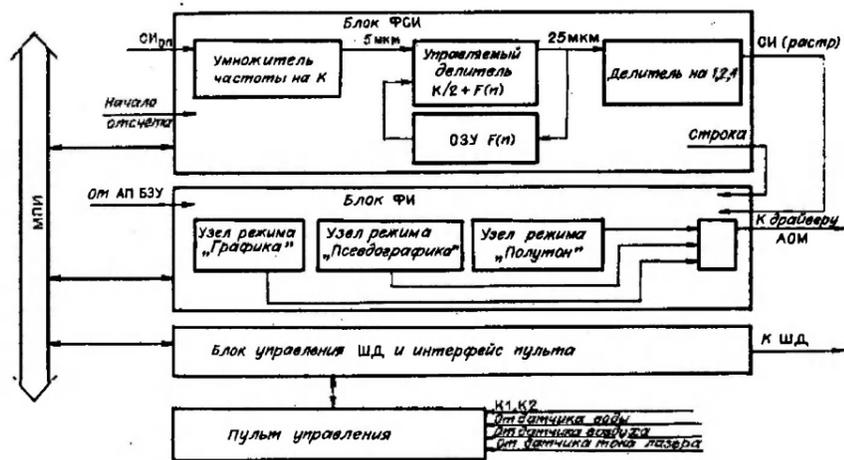


Рис. 4

номинального значения возникает ошибка $\Delta x(n)$ позиционирования X-координаты:

$$\Delta x(n) = 2\pi \Delta r n / M, \quad (1)$$

где n — номер СИ_{оп} от начала кадра до записываемого элемента изображения, M — полное число импульсов СИ_{оп} на оборот.

С целью устранения этой ошибки блок ФСИ содержит узел коррекции X-координаты, в котором точные синхроимпульсы СИ для управления модулятором формируются из синхроимпульсов СИ_{оп}, частота следования которых предварительно умножается множителем частоты с фазовой синхронизацией на $K = 10$, что соответствует шагу дискретизации $S = 5$ мкм по носителю, а затем делится управляемым делителем частоты на $I = K/2 + F(n)$, где F — функция поправок, и в зависимости от номера периода n и знака отклонения толщины носителя от номинальной может принимать значения 0, +1 или -1.

Функция поправок $F(n)$ загружается через МПИ в ОЗУ поправок блока ФСИ. При выборе $F(n)$ из соотношения с учетом (1)

$$S \sum_{i=1}^n F(i) = -\Delta X(n) \quad (2)$$

максимальная ошибка позиционирования будет не более $S = 5$ мкм.

В блоке формирования изображения модуля КУ по данным, поступающим из модуля буферной памяти через его порт АП, и по синхроимпульсам формируется сигнал $U_{АОМ}$ для драйвера акусто-оптического модулятора, управляющий интенсивностью записывающего лазерного луча.

Блок имеет три режима работы: режим вывода графической информации «Графика», режим вывода полутоновой информации «Полутон» и специальный режим, позволяющий улучшить воспроизведение мелких деталей графических изображений — «Псевдографика».

В режиме «Графика» каждый байт данных распаковывается в последовательность битов, по значениям которых на выходе блока ФИ формируются два значения $U_{АОМ}$, которые соответствуют режиму либо полного пропуска, либо полного перекрытия луча. В этом случае происходит запись непрерывных фрагментов изображения с минимальным размером, соответствующим выбранному шагу дискретизации.

Для получения полутоновых изображений на средах с малой фотографической широтой необходимо преобразование двумерного поля чисел, в котором значение каждого числа кодирует оптическую плотность (яркость) элемента изображения (пиксела) в бинарный массив, где плотность элемента задается соотношением площадей с высокой D_{\max} и низкой D_{\min} оптическими плотностями на регистрирующем материале в пределах некоторой элементарной площадки, называемой растровой точкой. Обычно в растровых выводных устройствах размер d регистрируемого пиксела постоянен и равен минимальному шагу дискретизации аппарата. Таким образом, для получения N градаций плотности необходима растровая точка, размер которой, по крайней мере, не меньше, чем $d\sqrt{N}$, что, безусловно, ухудшает разрешающую способность регистрируемого изображения. Кроме того, такое преобразование требует больших затрат машинного времени. В рассматриваемом устройстве получение полутоновых изображений происходит автоматически. В режиме «Полутон» байт данных преобразуется ШИМ-формирователем в импульс длительностью

$$T = Nt/256, \quad (3)$$

где N — десятичное значение входного данного в байте, t — временной интервал между синхроимпульсами. При этом размер W записанного пиксела варьируется в соответствии с входными данными за счет изменения длительности взаимодействия лазерного луча, имеющего гауссово распределение интенсивности, с термочувствительным слоем носителя. W изменяется от 0 до размера окружности с площадью, близкой к площади квадрата со стороной, равной шагу дискретизации. На рис. 5 представлен фрагмент полутонного офсетного оттиска, полученного с фотоформы, изготовленной на устройстве.

В режиме «Псевдографика» узел ФИ воспринимает и распаковывает входные данные, как предусмотрено режимом «Графика», но нулевое и единичное значения входного бита преобразуются каждое соответственно в одно из 16 заранее выбранных пользователем двоичных значений, которые затем обрабатываются ШИМ-формирователем, как в режиме «Полутон».

Технология записи. Способы записи на лазерном генераторе изображений основаны на эффектах испарения или модификации в результате локального нагрева при поглощении лазерного излучения различных термочувствительных слоев на гибких подложках [1—3]. В случае записи способом испарения термочувствительный слой должен обладать высокой начальной оптической плотностью в спектральном диапазоне $0,3 \div 0,4$ мкм — диапазоне сенсибилизации фоторезиста, используемого в процессе изготовления печатных плат.

Для изготовления рабочих шаблонов многослойных печатных плат (МПП) в качестве регистрирующего материала нами выбрана бессеребряная фототехническая диазопленка типа Ф1, обладающая рядом свойств, делающих ее наиболее подходящей для этих целей. Во-первых, пленка типа Ф1 является серийно выпускаемым материалом для изготовления рабочих шаблонов МПП — способом контактного копирования фотооригинала — и, таким образом, уже включена в технологический процесс. Во-вторых, маскирующее покрытие с высокой оптической плотностью (> 3) достаточно просто формируется на этой пленке способом темного сухого проявления в парах аммиака. Толщина покрытия при этом не превышает 5 мкм. В качестве основы диазопленки Ф1 применяется



Рис. 5

пленка полиэтилентерефталата (ПЭТФ) — практически безусадочный и термостабильный материал.

Разрушение маскирующего слоя пленки в процессе записи из-за его малой толщины по сравнению с длиной волны лазерного излучения и, следовательно, незначительного поглощения излучения в нем происходит в результате испарения материала подложки при интенсивном нагреве под воздействием сфокусированного луча. Глубина поглощения в ПЭТФ излучения с длиной волны 10,6 мкм составляет 50 мкм [4], и при размере записываемого пятна 50 мкм характер поглощения излучения является объемным, что при плотности мощности 1 МВт/см² в плоскости записи приводит к взрывному характеру испарения материала подложки [5].

Процесс испарения сопровождается также и плавлением материала подложки. Характерная профилограмма одиночной линии, записанной на поверхности пленки, представлена на рис. 6, а (Д — зоны без записи, С — зона регистрации). На рисунке хорошо видны наплывы, вызванные выбросом расплавленного материала. Микроструктура поверхности при записи с перекрытием соседних линий представлена на рис. 6, б. Период рельефа равен шагу записи, в данном случае 40 мкм. При контактном копировании на фоторезист копируемая плотность пробельных участков фотошаблона не превышает 0,15, что при высокой оптической плотности маскирующего слоя обеспечивает высокие эксплуатационные характеристики рабочих шаблонов МПП.

Кроме пленки Ф1, нами использовались и другие фототехнические материалы — пленки типа «Диаконт», «Фотоконт», «Светокон». Эти материалы имеют своей основой также пленку ПЭТФ и отличаются с точки зрения использования их в качестве регистрирующих материалов для лазерной записи лишь способами формирования маскирующего слоя.

На рис. 7 представлены спектры поглощения маскирующих (а) и пробельных (б) элементов фотошаблонов (изготовлены на различных пленках до и после записи на ЛГИ), полученные на денситометре ДП-1: 1 — фотошаблон изготовлен на ЛГИ на пленке Ф1, проявленной до насыщения; 2 — рабочая копия на пленке Ф1, изготовленная по стандартной технологии контактными копированием; 3, 4 — фотошаблоны на пленках «Фотоконт» и «Светокон» соответственно, изготовленные на ЛГИ. Из рисунка видно, что оптическая плотность пробельных участков фотошаблонов не зависит от типа пленки. Таким образом, контрастные характеристики фотошаблонов определяются не процессом записи и последующей обработки, а предварительным, легко контролируемым, процессом подготовки материала. Это выгодно отличает применяемый нами способ записи от стандартных методов регистрации на галоидосеребряных материалах.

Существенным недостатком регистрирующих материалов для лазерной тепловой записи на основе бессеребряных фототехнических пленок является их низкая энергетическая чувствительность, определяющаяся поглощением излучения с длиной вол-

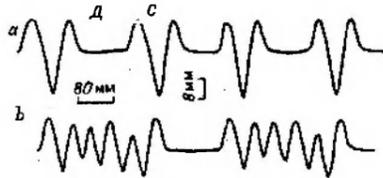


Рис. 6

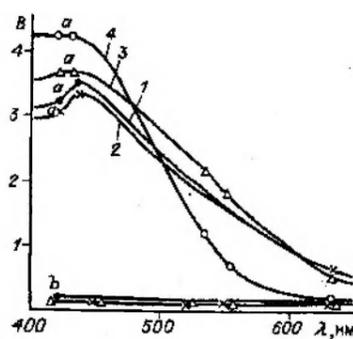


Рис. 7

ны 10,6 мкм в материале основы — пленке ПЭТФ. Величина ее не превышает 2,0 см/Дж [2]. Поэтому наиболее эффективной запись будет при максимально острой фокусировке и минимальном шаге сканирования в процессе записи. Оптическая схема сканирования ЛГИ формирует в проектировании шаблонов МПП минимальный шаг сканирования выбирается равным 25 мкм, при этом скорость сканирования равна 8 об./с при мощности пучка лазерного излучения в плоскости записи 10 Вт.

Эксперименты по записи фотошаблонов на ЛГИ показали, что реально получаемая разрешающая способность ограничивается погрешностью дискретизации системы сканирования. В случае минимального раstra (25 мкм) ее значение достигает величины 10 лин/мм, что позволило получить шаблоны с минимальным размером изображений проводников и расстоянием между ними 50 мкм.

В процессе контактного копирования разрешающая способность переноса изображения на фольгированный стеклотестолит неизбежно снижается, что связано со значительной толщиной применяемого слоя фоторезиста (30—50 мкм) и ограниченной адгезией его к медной фольге.

На рис. 8, а представлена микрофотография фрагмента фотошаблона печатной платы, записанного на пленке Ф1, на рис. 8, б — фрагмент слоя МПП после контактного переноса изображения с фотошаблона и проявления фоторезиста. На микрофотографии фрагмента фотошаблона хорошо виден растровый характер записи и обусловленная им погрешность дискретизации — иззубренность края с периодом раstra (40 мкм в данном случае). На следующей фотографии видно, что ограниченная разрешающая способность фоторезиста и процесса его проявления сглаживает края, сохраняя средний размер элемента изображения.

ВЫВОДЫ

Разработанное лазерное термографическое устройство обеспечивает вывод фотошаблонов печатных плат на бессеребряные носители, не требующие дальнейшего проявления с разрешением не хуже 10 лин/мм и накопленной ошибкой не более 15 мкм на всем поле записи.

Аппаратные возможности, заложенные в устройстве, позволяют, применяя ранее разработанные технологии лазерной термографии, выводить слайды, графические и полутонные изображения на бумажном носителе, собственно печатные платы [1—3], изготавливать фотоформы для офсетной печати.

Проведенные испытания показали, что устройство обладает следующими характеристиками: максимальный формат носителя 600 × 500 мм · мм; максимальная зона записи 590 × 480 мм · мм; скорость

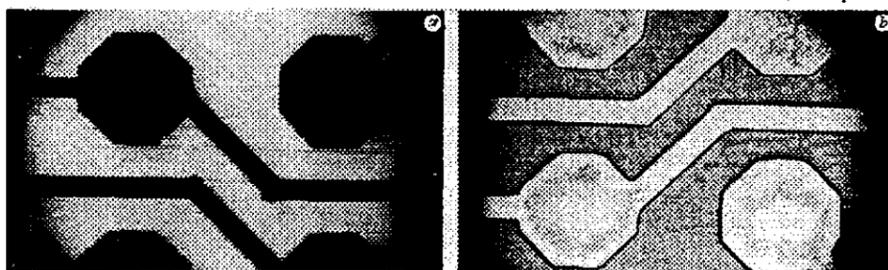


Рис. 8

записи 5 (96) м/с (К, пиксел/с); полное время записи 60 мин (max); шаг дискретизации 25, 50, 100 мкм; погрешность 2 мкм на шаг и 15 на 300 мм; число воспроизводимых полутонов > 16; тип носителя — термочувствительные носители, полимерные пленки с маскирующим покрытием толщиной до 5 мкм; толщина подложки носителя 0,1—0,5 мм; источник входных данных — магнитная лента, гибкий магнитный диск, последовательный канал RS-232; энергетические требования 220 В, 50 Гц, 1500 Вт.

Образец устройства находится в опытной эксплуатации на участке печатных плат ИАиЭ СО АН СССР. В 1990 г. на нем изготовлено более 200 фотошаблонов для многослойных печатных плат.

Авторы выражают признательность В. А. Белаго за активное участие в создании и производственных испытаниях устройства, Д. А. Грицнко, В. И. Печуркину и Ю. А. Шишлову за помощь, оказанную при разработке и наладке устройства, а также В. И. Герасько, И. М. Арсенину и А. А. Янтимирову за ценные консультации по оптимизации взаимодействия аппаратных и программных средств обеспечения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баев С. Г., Бессмельцев В. П., Коронкевич В. П., Ткачук Ю. Н. Оптическая регистрация информации на бумаге при помощи CO₂- и ИАГ-лазеров // Квантовая электроника.—1984.—11, № 2.
2. Баев С. Г., Бессмельцев В. П. Запись в реальном времени рефракционных полутоновых транспарантов на полимерных пленках // Автометрия.—1986.—№ 2.
3. Андреев В. М., Баев С. Г., Бессмельцев В. П. и др. Исследование процессов лазерного термохимического формирования металлических проводников на диэлектрических подложках // Автометрия.—1990.—№ 3.
4. Горлин Г. Б., Парицкий Л. Г., Тиснен Т. В. Фотографическая система для регистрации 10,6 мкм излучения // ЖТФ.—1987.—57, № 1.
5. Григорьянц А. Г., Соколов А. А. Лазерная обработка неметаллических материалов.—М.: Высш. шк., 1988.
6. Noguchi Masaru. Efficient use of laser power in heat-mode recording // Appl. Opt.—1982.—21, N 15.—P. 2665.
7. Орловский Е. Л. Передача факсимильных изображений.—М.: Связь, 1980.—Гл. 8.

Поступила в редакцию 17 декабря 1990 г.

УДК 621.376.52

М. А. Боков, А. Н. Максимов, К. Г. Шумилов, В. И. Юрлов

(Новосибирск)

ГЕОДЕЗИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА НА ОСНОВЕ АКУСТООПТИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ

Объектом исследований является система, созданная на основе акусто-оптического преобразователя линейных смещений (АОПЛС), предназначенная для высокоточных автоматизированных измерений положений объектов относительно друг друга. Цель работы — экспериментальное исследование макета системы в условиях тоннеля метрополитена на прямолинейном участке длиной 102 м. Изложены принципы действия одно- и двухкоординатных АОПЛС и специфика работы системы в режиме одновременного измерения положений промежуточной и последней точек дистанции. Показано, что такой режим, характерный для систем с АОПЛС, позволяет в 3 раза повысить точность измерений.

Одной из характерных черт современного технического прогресса является постоянное повышение требований к техническим средствам