
**СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ ПРИБОРОВ
И ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ МЕТОДИК**

УДК 621.389

© М. А. Коробков, В. Д. Зайкин, Е. С. Маревичев, О. В. Хомутская, Ф. В. Васильев, 2023

**СИСТЕМА ПРЯМОГО ЭКСПОНИРОВАНИЯ
НА ОСНОВЕ ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ МАТРИЦЫ**

Статья посвящена исследованию возможности использования жидкокристаллических (ЖК) матриц в качестве фотошаблонов для переноса проводящего рисунка на фоточувствительный материал с помощью ультрафиолетового (УФ) излучения при производстве печатных плат (ПП). В ходе исследования произведен анализ технологий экспонирования, используемых при производстве ПП. Разработана структурная схема системы прямого экспонирования с применением ЖК-матрицы и определены основные элементы ее конструкции. На основе монохромного ЖК-экрана PengJi PJ3D623V1 создан прототип установки, на котором проведен ряд экспериментов. В ходе проведения экспериментов уточнены следующие конструкционные параметры установки: тип рассеивателя (матовый), расстояние между рассеивателем и ЖК-матрицей (37 мм), длина волны источника УФ-излучения (365 нм). Также эксперименты позволили определить технологические характеристики операции экспонирования: необходимое время экспонирования для источников с различной длиной волны, минимально воспроизводимые размеры проводящего рисунка. Подтверждена возможность использования разработанной системы: успешно изготовлена ПП, соответствующая четвертому классу точности по ГОСТ Р 53429-2009 с минимальной шириной проводников и зазоров 0.2 мм (толщина слоя медной фольги: 35 мкм). Произведен анализ преимуществ и недостатков системы, на основе которого определена область возможного применения исследуемой технологии, а также перспективы ее развития.

Кл. сл.: прямое экспонирование, процессы производства печатных плат, жидкокристаллический дисплей

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время стремительное развитие информационных технологий является причиной увеличения спроса на электронные устройства, что влечет за собой потребность в увеличении объемов производимых изделий, уменьшении времени их изготовления, повышении надежности [1–3], сведению к минимуму числа дефектной продукции [4–6]. Решить поставленные задачи возможно путем совершенствования технологических процессов [7].

При изготовлении печатных плат (ПП) одним из важнейших этапов производства является этап переноса проводящего рисунка на заготовку посредством нанесения на последнюю фоточувствительного материала с последующим воздействием на него ультрафиолетовым (УФ) излучением, т.е. этап экспонирования. Именно этап экспонирования в большей степени определяет минимально воспроизводимые параметры проводящего рисунка на ПП и влияет на возникновение дефектов в процессе их производства. С одной стороны, на операции экспонирования можно попытаться устранить дефекты, полученные на прошлых технологических операциях, например механической обработки [8]. С другой стороны, сама операция экспонирования может являться источником де-

фектов [9], обнаружение которых затруднительно и зачастую происходит на последующих этапах, например после травления заготовки.

В настоящее время среди установок экспонирования отсутствует как таковая золотая середина. На рынке присутствуют установки, имеющие высокую стоимость и точность воспроизведения проводящего рисунка, и дешевые установки, которые позволяют изготавливать печатные платы низкого класса точности. Поэтому возникает потребность в поиске новых решений, которые будут иметь невысокую стоимость, но при этом обеспечивать достаточные характеристики для изготовления печатных плат современного уровня.

**АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЙ ЭКСПОНИРОВАНИЯ
В ПРОИЗВОДСТВЕ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ**

На данный момент в производстве ПП распространены следующие технологии экспонирования: контактная, бесконтактная с микрозазором и технология прямого экспонирования, каждая из которых имеет свои преимущества и недостатки [10].

В контактной технологии для формирования рисунка применяется пленочный фотошаблон, который находится в непосредственном контакте с заготовкой. Преимущества данного метода

закладаются в: относительной дешевизне требуемого оборудования за счет отсутствия сложной оптической системы; простоте технологического процесса; наиболее крутой характеристике изменения пропускаемой энергии между маскируемыми и прозрачными участками фотошаблона. Также технология имеет большое количество недостатков: точность воспроизведения проводящего рисунка определяется точностью плоттера; нестабильность геометрических размеров фотошаблона при изменении температуры и влажности, что может привести к искажениям рисунка и затем к браку; физическое изнашивание фотошаблонов; трудоемкость совмещения фотошаблона и заготовки при изготовлении двусторонних и многослойных ПП за счет деформации последней.

Бесконтактная технология с микрозазором схожа с контактной. Отличие заключается в том, что между фотошаблоном и заготовкой оставляют небольшой зазор (от 100 до 500 мкм). Наличие зазора снижает износ фотошаблона, но и снижает точность воспроизведения рисунка за счет большего рассеивания энергии. Все остальные недостатки контактного метода остаются.

В технологии прямого экспонирования лазер при помощи оптической системы воздействует на фоточувствительный материал для формирования рисунка. Преимуществами данной технологии являются: полное исключение фотошаблонов; возможность компенсации деформации заготовки путем изменения воспроизводимого лазером рисунка; простота совмещения проводящего рисунка и заготовки. Таким образом, данная технология лишена недостатков двух предыдущих, но обладает другими: высокая стоимость оптической системы;

зависимость точности воспроизведения рисунка от размера пятна лазерного луча и механической системы, осуществляющей отклонение этого луча; наиболее пологая кривая распределения энергии излучения, что влечет за собой наибольшее паразитное засвечивание фоторезиста и, как следствие, снижение точности воспроизводимого рисунка.

В настоящее время крупные предприятия, производящие ПП, стараются осуществить переход на технологию прямого экспонирования, в то время как на малых предприятиях распространена технология контактного экспонирования из-за дороговизны установок прямого экспонирования. Исходя из растущих потребностей промышленности в производстве и усовершенствовании технологических процессов встает вопрос о возможности создания технологии, которая будет сочетать в себе преимущества технологии прямого и контактного экспонирования. Со стороны прямого экспонирования необходимо обеспечить: отсутствие пленочных фотошаблонов, возможность изменения размеров проводящего рисунка, простоту совмещения проводящего рисунка и заготовки. Со стороны контактного экспонирования желательно получить отсутствие сложной оптической системы и, как следствие, высокой цены установки.

РАЗРАБОТКА УСТАНОВКИ ЭКСПОНИРОВАНИЯ

Схожий с экспонированием процесс также встречается в 3D-печати, а именно в технологии масочной стереолитографии (Mask Stereolithography, MSLA) [11].

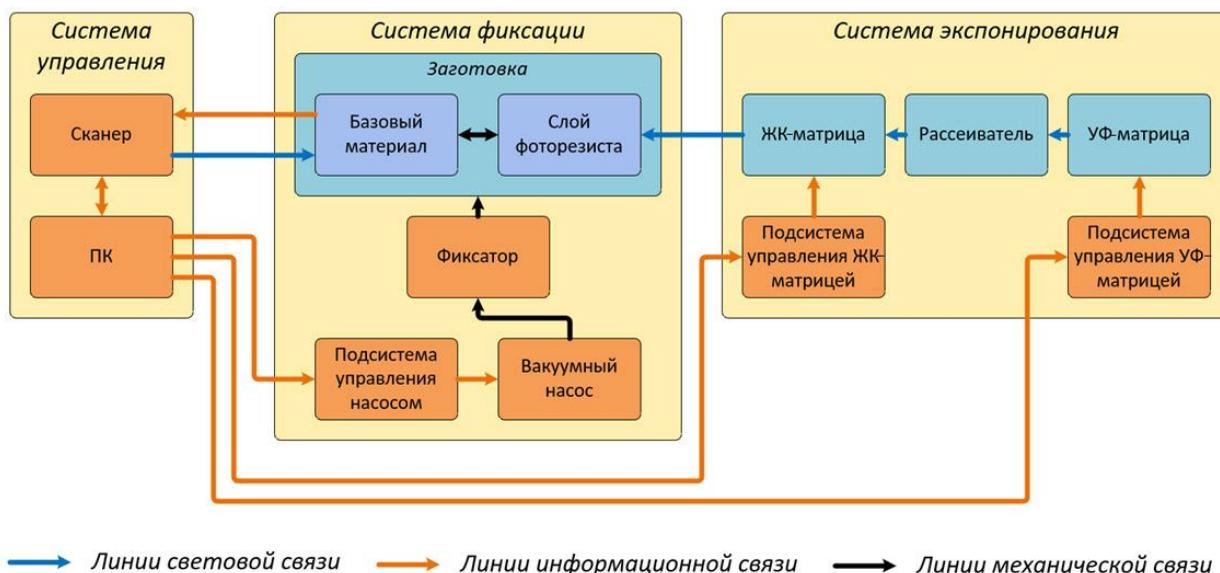


Рис. 1. Структурная схема системы экспонирования

В MSLA-технологии используется оптическая система, состоящая из источника УФ-излучения и ЖК-матрицы. На экран последовательно поступает изображение слоев изготавливаемой модели. Жидкая фотополимеризующая композиция затвердевает под действием УФ-света. Затем движущаяся платформа с сформированным на ней слоем поднимается выше для полимеризации следующего слоя.

Таким образом, MSLA 3D-принтеры обеспечивают селективную полимеризацию, что позволяет сделать предположение о возможности использования данного принципа при экспонировании светочувствительного материала при производстве ПП: воздействовать на заготовку УФ-светом, проходящим через ЖК-матрицу, на которой находится изображение проводящего рисунка. На основе вышеизложенной технологии разработана структурная схема системы экспонирования с использованием ЖК-матрицы (рис. 1).

Система включает в себя три основные составляющие:

1. *Систему управления* — из персонального компьютера (ПК) и модуля сканирования. Сканер получает изображение одной из сторон заготовки с просверленными в ней отверстиями и передает его на ПК. ПК обеспечивает управление сканером и другими системами, а именно: системой экспонирования и системой фиксации, а также осуществляет обработку изображения заготовки, получен-

ной со сканера [12]. На основе анализа смещений отверстий относительно файлов конструкторской документации ПК производит изменение размеров изображения проводящего рисунка для обеспечения наилучшего совмещения последнего с заготовкой.

2. *Систему экспонирования* — из подсистемы управления ЖК-матрицей и подсистемы управления УФ-матрицей. Подсистема управления ЖК-матрицей получает от управляющей программы ПК скорректированное изображение проводящего рисунка. Подсистема управления УФ-матрицей по команде управляющей программы обеспечивает необходимое время экспонирования. Также между УФ- и ЖК-матрицами необходимо наличие рассеивателя, обеспечивающего параллельность УФ-лучей и, соответственно, равномерное распределение энергии экспонирования по заготовке.

3. *Систему фиксации* — обеспечивает плотный контакт между ЖК-матрицей и заготовкой в процессе экспонирования. В этом случае целесообразно использовать технологию вакуумного прижатия, используемую в установках контактного экспонирования. Заготовка с нанесенным светочувствительным материалом располагается на ЖК-матрице, а сверху накрывается держателем, выполненным из прозрачной полимерной пленки. Затем между матрицей и пленкой с помощью насоса создается разряжение, прижимающее заготовку к матрице.

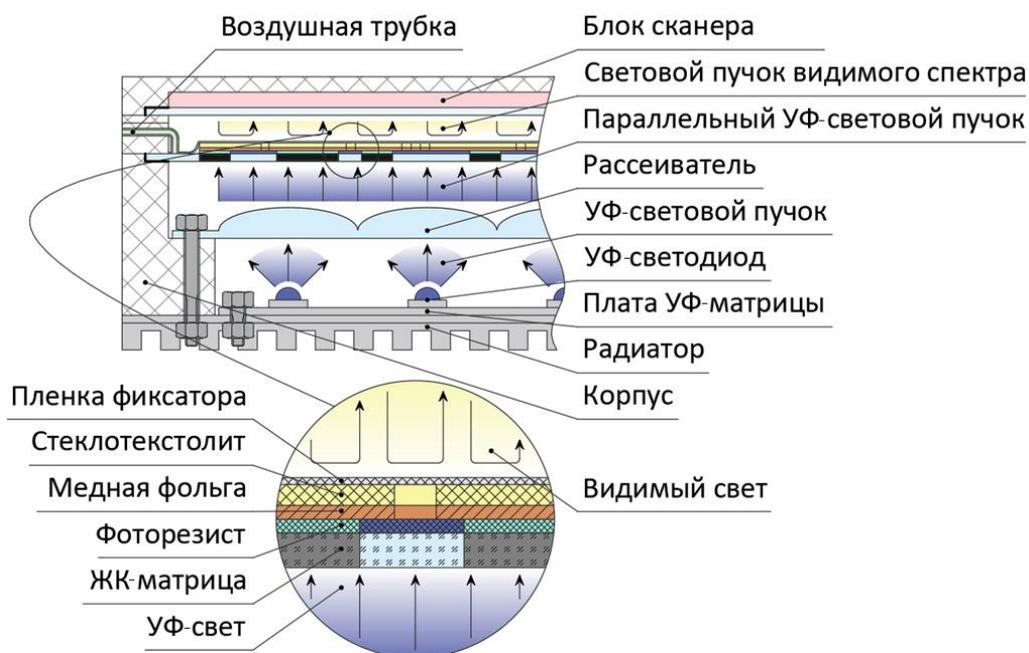


Рис. 2. Принцип работы установки экспонирования

На основе разработанной структурной схемы (рис. 1) предлагается принцип работы установки экспонирования, представленный на рис. 2.

Оператор помещает заготовку с нанесенным фоторезистом на ЖК-экран и накрывает ее сверху рамкой с фиксирующей пленкой. Затем обеспечивается необходимое прижатие заготовки путем откачки воздуха, осуществляется сканирование верхней стороны заготовки и на основе результатов сканирования производится изменение изображения проводящего рисунка. На последнем этапе изображение выводится на ЖК-матрицу, источник излучения включается на необходимое время и затем происходит выключение системы фиксации.

Разработанная структурная схема и изложенный принцип работы в общем виде описывают возможность применения ЖК-матрицы для экспонирования ПП. Однако остается большое количество частных вопросов касательно конструкции установки, технологических параметров операции и, что более важно, принципиальной работоспособности технологии: сможет ли ЖК-экран в достаточной степени замаскировать находящийся под ним фоторезист? Таким образом, возникает необходимость в экспериментальном исследовании и апробировании технологии.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Оборудование, материалы, методы

Для принципиальной проверки работоспособности предложенного метода экспонирования раз-

работан лабораторный прототип (рис. 3), который не содержит в себе модуля сканирования, а также имеет упрощенную систему фиксации заготовки.

Прототип установки экспонирования собран с использованием следующих основных компонентов:

- персональный компьютер;
- монохромная ЖК TFT-матрица PengJi PJ3D623V1c диагональю 6.23 дюйма, разрешением 3840×2400 пикселей и размером пикселя 35×35 мкм;
- плата вывода изображения на экран с интерфейсом HDMI;
- блок питания ЖК-матрицы 5 В, 3 А;
- светодиодные УФ-матрицы с длинами волн: 365, 385 и 395 нм;
- драйвер питания УФ-матрицы;
- блок питания УФ-матрицы 12 В, 5 А;
- матовая и глянцевая рассеивающие линзы.

Для решения проблем, обозначенных ранее, предлагается провести эксперименты, направленные на уточнение параметров конструкции, а именно: определение типа рассеивающей линзы и необходимого расстояния между рассеивателем и матрицей. Также подлежит исследованию воспроизводимость проводящего рисунка в зависимости от времени экспонирования и длины волны источника излучения.

Для всех следующих экспериментов определен следующий технологический процесс изготовления образцов.

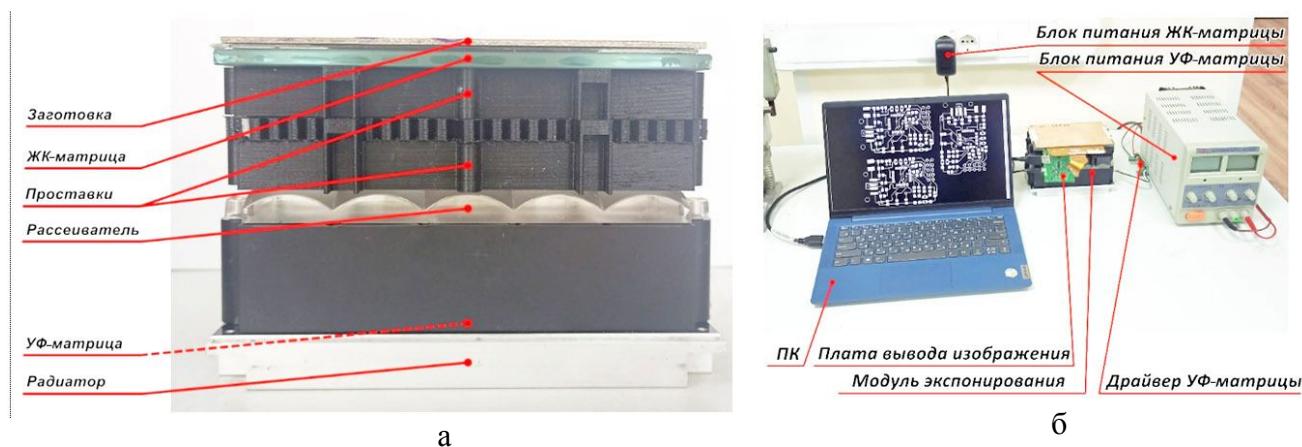


Рис. 3. Лабораторный прототип установки экспонирования. а — модуль экспонирования; б — прототип целиком

1. Вырубка заготовки с размерами 90×70 мм из двустороннего фольгированного стеклотекстолита FR-4 с толщиной базового материала 0.5 мм и толщиной фольги 35 мкм.

2. Сверление технологических отверстий для крепления заготовки.

3. Механическая дезоксидация поверхности в зачистной машине Bungard Elektronik RBM 300 BLC.

4. Высушивание и нагрев заготовки до температуры 70°C .

5. Нанесение сухого пленочного фоторезиста Ordyl Alpha AM 140 на ламинаторе Bungard Elektronik RLM 419p.

6. Экспонирование заготовки на прототипе. Для этого заготовка помещалась на экран и фиксировалась по краям клейкой лентой. Затем на экран осуществлялся вывод изображения с последующим ручным включением светодиодной матрицы на заданное время.

7. Проявка фоторезиста раствором кальцинированной соды с помощью установки струйного травления Bungard Splash при температуре раствора 30°C . Каждые 30 с производился визуальный осмотр заготовки на предмет снятия фоторезиста.

8. Струйная промывка заготовки водой.

Эксперимент 1: определение конфигурации рассеивателя

Поскольку равномерность распределения энергии света при экспонировании занимает одно из ключевых мест в процессе экспонирования, то на первом этапе произведено сравнение двух имеющихся линз: матовой и глянцевой (рис. 4, а, б). Для визуальной оценки рассеивания УФ-свет пропущен через обе линзы на белый лист бумаги (рис. 4, в, г).

На рис. 4 видно, что матовая линза в большей степени рассеивает проходящий через нее свет. В то время как свет, проходящий сквозь глянцевую линзу, оставляет заметный сетчатый рисунок.

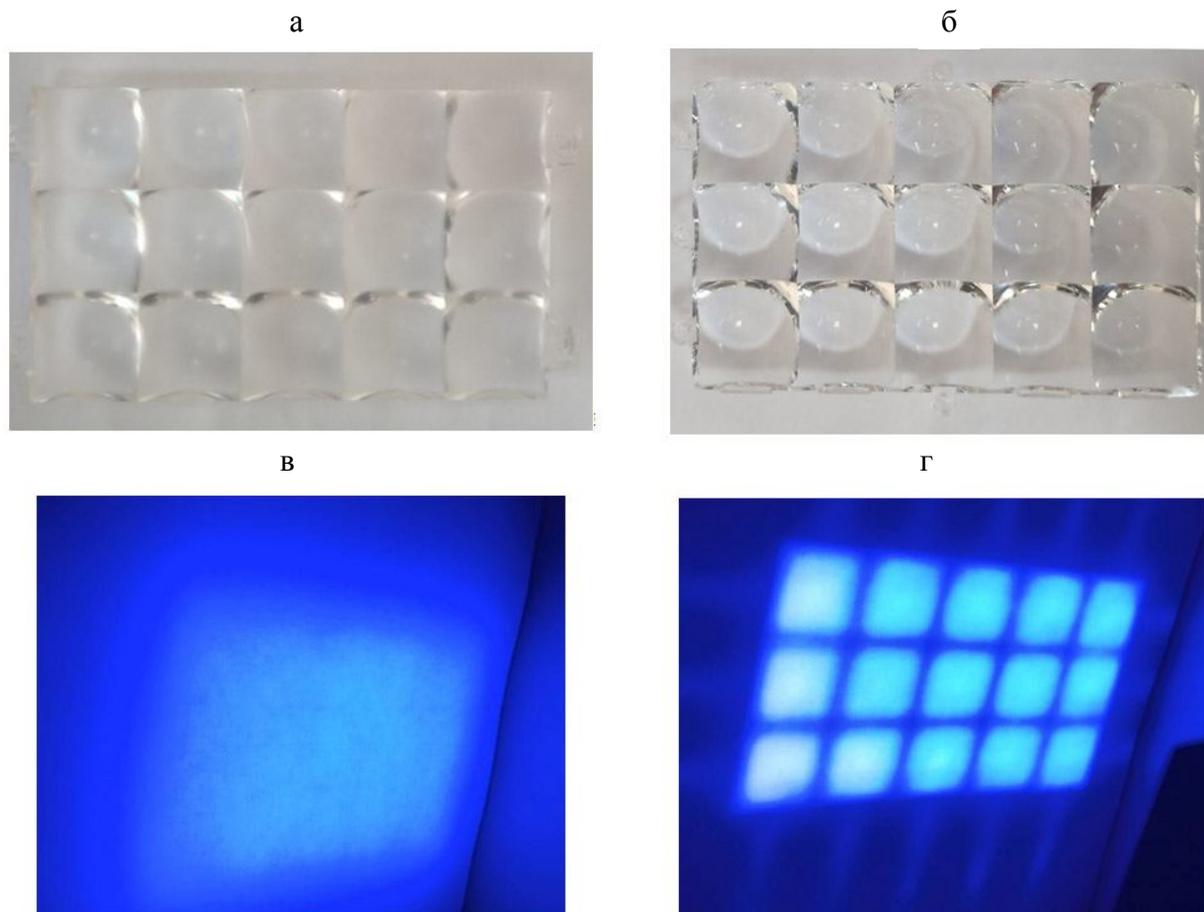


Рис. 4. Картины рассеивания света в зависимости от линзы.

а — матовая линза; б — глянцевая линза; в — рассеивание света, прошедшего через матовую линзу, на листе бумаги; г — рассеивание света, прошедшего через глянцевую линзу, на листе бумаги

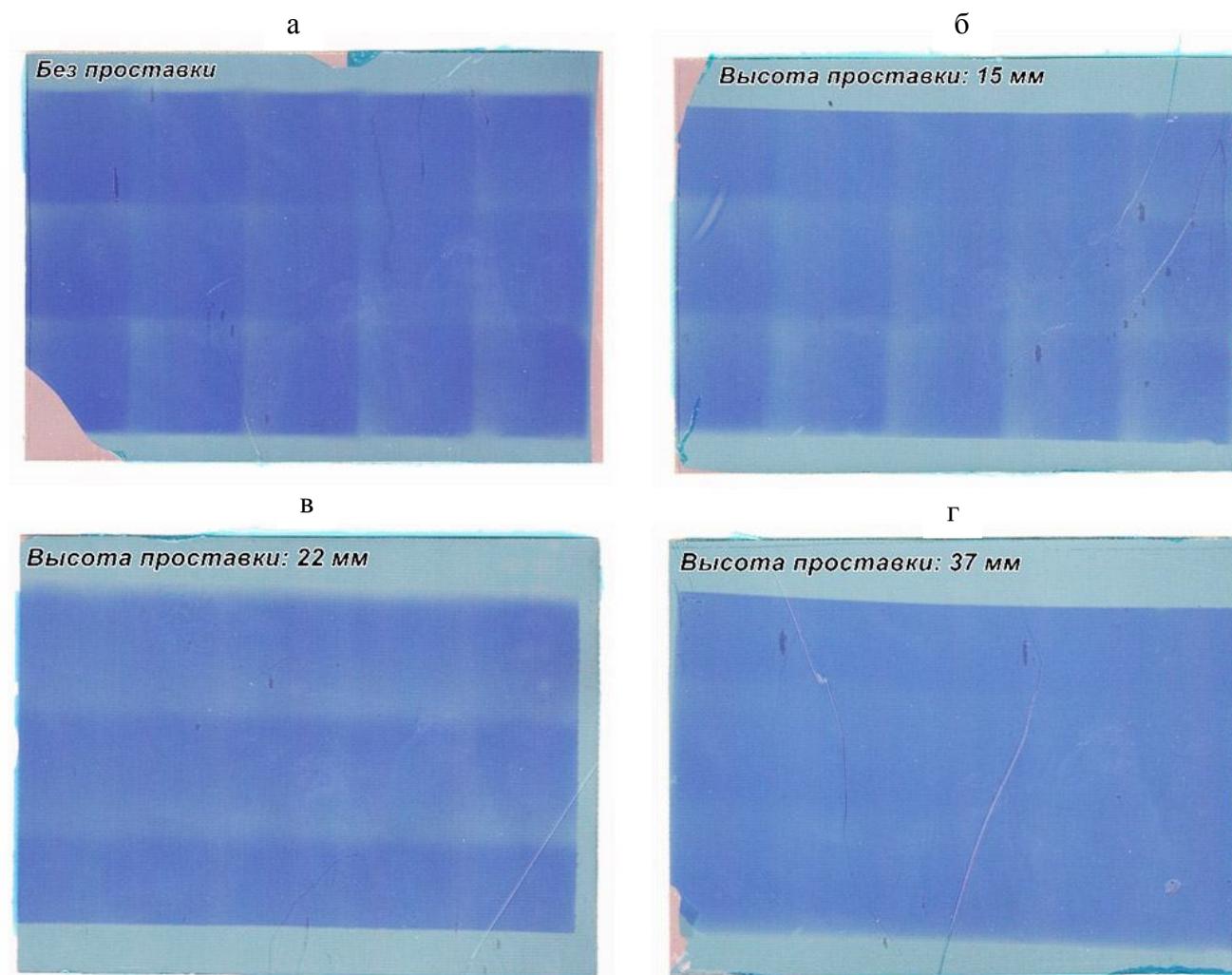


Рис. 5. Картины рассеивания света в зависимости от расстояния между матовой линзой и ЖК-матрицей. а — линза и ЖК-матрица установлены вплотную; б — 15 мм; в — 22 мм; г — 37 мм

Однако при расположении ЖК-матрицы непосредственно над матовой линзой все равно имеет место неравномерность распределения света от источника (рис. 5, а). Для снижения этого негативного эффекта спроектированы и напечатаны на 3D-принтере две проставочные рамки высотой 15 и 22 мм, устанавливаемые между рассеивателем и ЖК-матрицей. Затем произведено сравнение результатов экспонирования в разных условиях: без проставок, с проставкой 15 мм, с проставкой 22 мм и с двумя проставками, обеспечивающими расстояние от рассеивателя до матрицы 37 мм (рис. 5). Во время эксперимента применялась светодиодная матрица с длиной волны 395 нм, а время экспонирования составляло 30 с.

Из полученных результатов видно, что при отсутствии проставочных рамок цвет фоторезиста

явно темнее, и отчетливо виден сетчатый рисунок, образованный светом после прохождения через линзу. При использовании отдельно проставочных рамок 15 и 22 мм также виден сетчатый рисунок, однако цвет экспонированного фоторезиста приобрел более светлый оттенок. С применением двух проставочных рамок вместе сетчатый рисунок практически отсутствует. На основании полученных результатов принято решение о совместном использовании в дальнейших исследованиях матовой линзы и двух проставочных рамок.

Эксперимент 2: определение времени экспонирования

Цель эксперимента заключается в определении оптимального времени экспонирования фоторезиста

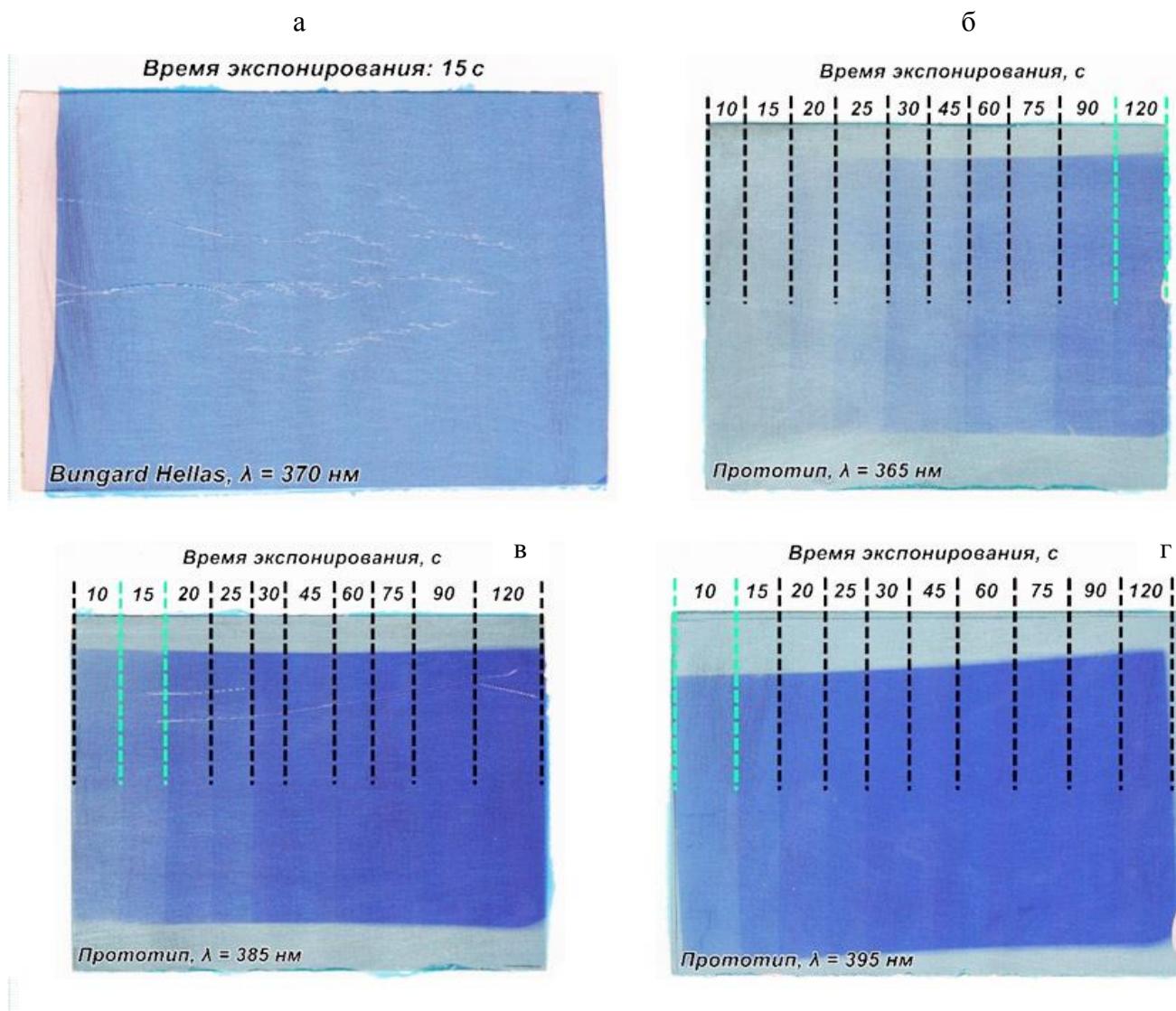


Рис. 6. Изменение цвета фоторезиста в зависимости от времени экспонирования t_{exp} . а — эталон, полученный на установке Bungard Hellas; б–г — прототипы с установленными источниками излучения с длиной волны λ , равной 365, 385, 395 нм соответственно. Светлым пунктиром на рисунке отмечены те секции, которые совпали по тону с эталоном

в зависимости от длины волны используемой светодиодной УФ-матрицы. Для этого экспонируемая область фоторезиста разделена на 10 секций, каждая из которых имеет свое время экспонирования (в секундах): 10, 15, 20, 25, 30, 45, 60, 75, 90 и 120. Сначала на ЖК-экран выводился полностью прозрачный шаблон в течение 10 с. Затем выводился шаблон с одной непрозрачной секцией еще на 5 с, далее — с двумя еще на 5 с и т.д. Таким образом, последовательно закрывались секции экспонирования от минимального времени к максимальному.

В качестве эталонного результата использована заготовка с засвеченным фоторезистом на установке контактного экспонирования Bungard Hellas с временем экспонирования в 15 с. Затем полученные результаты визуально сравнивались с эталоном. Результаты эксперимента представлены на рис. 6.

Светлым пунктиром на рисунке отмечены те секции, которые совпали по тону с эталоном. При использовании светодиодной матрицы с длиной волны излучения 365 нм, начиная с времени экспонирования в 20 с, отчетливо видны секции и границы между ними, а совпадение цвета

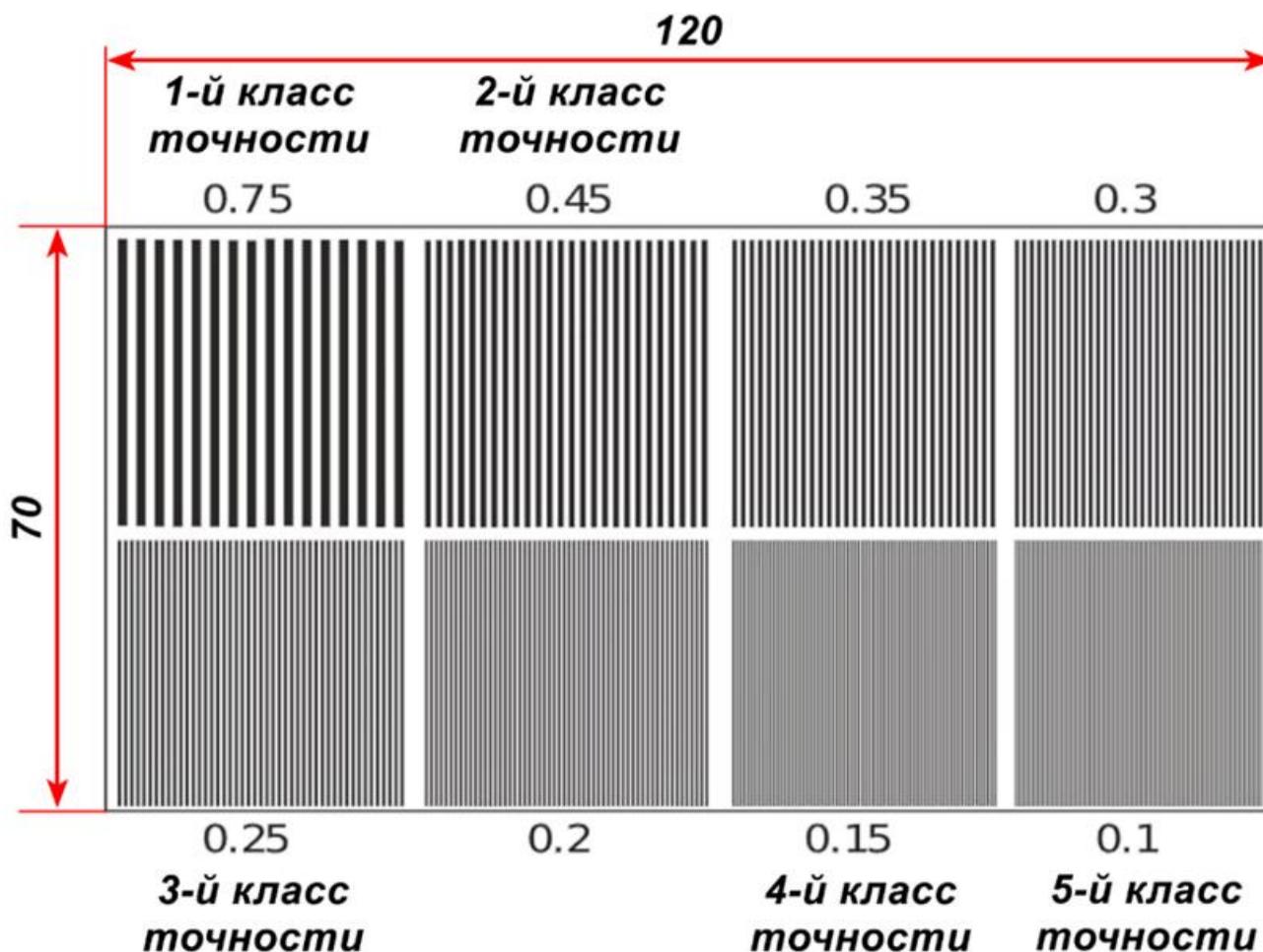


Рис. 7. Позитивное отображение фотошаблона, используемого для определения воспроизводимости проводников (числами рядом с проводящим рисунком обозначена ширина проводников и зазоров между ними в мм)

наблюдается в конце исследуемого диапазона при времени экспонирования в 120 с. На светодиодных матрицах 385 и 395 нм совпадение цвета наблюдается при времени экспонирования 15 и 10 с соответственно. Большая часть секций имеют цвет темнее, чем у эталона, что говорит об избыточном времени экспонирования.

Эксперимент 3: определение воспроизводимости проводящего рисунка

Следующий эксперимент направлен на определение воспроизводимости проводников различной ширины и зазоров между ними. Для проведения эксперимента создана топология (рис. 7), содержащая участки от первого до пятого класса точности по ГОСТ Р 53429-2009 [13].

Поскольку предыдущий эксперимент позволил получить только приближенную оценку времени

экспонирования, то текущий эксперимент включает в себя незначительное варьирование времени относительно определенного ранее.

Зададим шаг варьирования времени экспонирования:

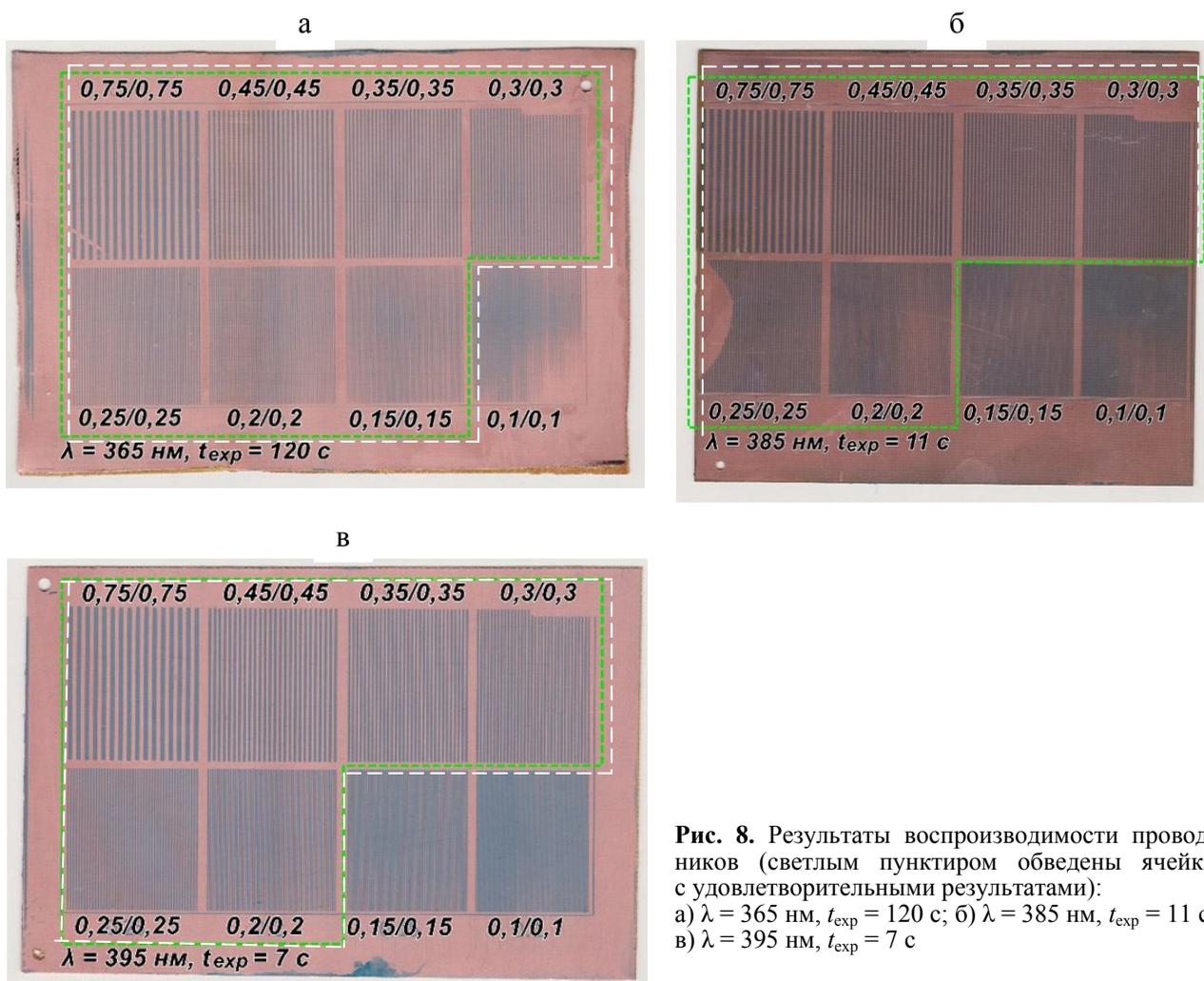
$$\Delta = \frac{T}{4},$$

где T — время экспонирования, полученное в предыдущем эксперименте. Ввиду технических ограничений шаг варьирования округлен до целого числа.

На основе полученного шага варьирования Δ определим времена экспонирования t_{exp} , которые будут использоваться при проведении экспериментов: $T - 2\Delta$, $T - \Delta$, T , $T + \Delta$, $T + 2\Delta$. Подобное решение позволит снизить неточность определения полученного времени экспонирования T .

Табл. Воспроизводимость проводников в зависимости от длины волны источника излучения λ и времени экспонирования t_{exp}

Длина волны $\lambda = 365$ нм	Время экспонирования t_{exp} , с:	60	90	120	150	180
	Минимальная воспроизводимая ширина проводника и зазора, мм	0.3	0.2	0.15	0.2	0.25
Длина волны $\lambda = 385$ нм	Время экспонирования t_{exp} , с:	7	11	15	19	23
	Минимальная воспроизводимая ширина проводника и зазора, мм	0.25	0.2	0.25	0.25	0.3
Длина волны $\lambda = 395$ нм	Время экспонирования t_{exp} , с:	4	7	10	13	16
	Минимальная воспроизводимая ширина проводника и зазора, мм	0.35	0.2	0.25	0.3	0.35



Полученные результаты эксперимента представлены в таблице. Наилучшие результаты экспонирования для УФ-матриц с различной длиной

волны λ приведены на рис. 8. Наилучший результат воспроизводимости проводящего рисунка показала матрица с длиной волны излучения 365 нм

при времени экспонирования 120 с. При такой конфигурации удалось изготовить топологию, соответствующую четвертому классу точности по ГОСТ Р 53429-2009 [13], с шириной проводника и зазора 0.15 мм. Матрицы с длиной волны 385 и 395 нм показали одинаковую воспроизводимость проводников до 0.2 мм при времени экспонирования 11 и 7 с соответственно.

Рассмотрим присутствующие дефекты на примере образца, полученного с применением 365 нм УФ-матрицы и временем экспонирования 120 с (рис. 9, дефекты пронумерованы 1–4).

Выявлено наличие отслаивающихся кусков фоторезиста из-за некачественной дезоксидации поверхности заготовки и, как следствие, низкой адгезии между фоторезистом и заготовкой (рис. 9, 1). Сужение зазора между дорожками из-за неравномерности излучения произошло по причине грубого определения расстояния от рассеивателя до ЖК-экрана, что послужило причиной недостаточно равномерного излучения (рис. 9, 2). Одновременное частичное отсутствие фоторезиста (рис. 9, 3) и наличие переотвержденного фоторезиста (рис. 9, 4) вызвано разным расстоянием от заготовки до ЖК-матрицы, что является следствием неплотного прилегания заготовки. В результате анализа дефектов можно сделать выводы, что причиной полученных дефектов являются либо другие технологические операции, либо неточности в определении параметров конструкции, которые возможно устранить, проведя дополнительные исследования.

Таким образом, в результате проведенных экспериментов в первую очередь удалось принципиально оценить возможность переноса проводящего рисунка на заготовки методом прямого экспонирования с использованием ЖК-матрицы. Также проведенные эксперименты позволили уточнить как параметры конструкции для прототипа установки экспонирования, так и параметры технологической операции:

1. В качестве источника УФ-света целесообразно использовать светодиодные матрицы с длиной волны 365 нм, т.к. большее время экспонирования позволяет более точно сообщать фоторезисту необходимое количество энергии для полимеризации, а также увеличить предельные отклонения времени для бездефектного экспонирования. Однако после более точного определения параметров использование источника излучения с большей длиной волны при обеспечении возможности контроля времени экспонирования с точностью до миллисекунд может существенно сократить время выполнения операции.

2. Лучшее рассеивание света происходит при использовании матовой линзы и обеспечении расстояния между линзой и ЖК-экраном, равного 37 мм, т.е. при совместном использовании проставочных рамок высотой 22 и 15 мм.

3. При времени экспонирования 120 с удалось воспроизвести рисунок с параметрами минимальной ширины проводника и зазора между проводниками, равными 0.15 мм.

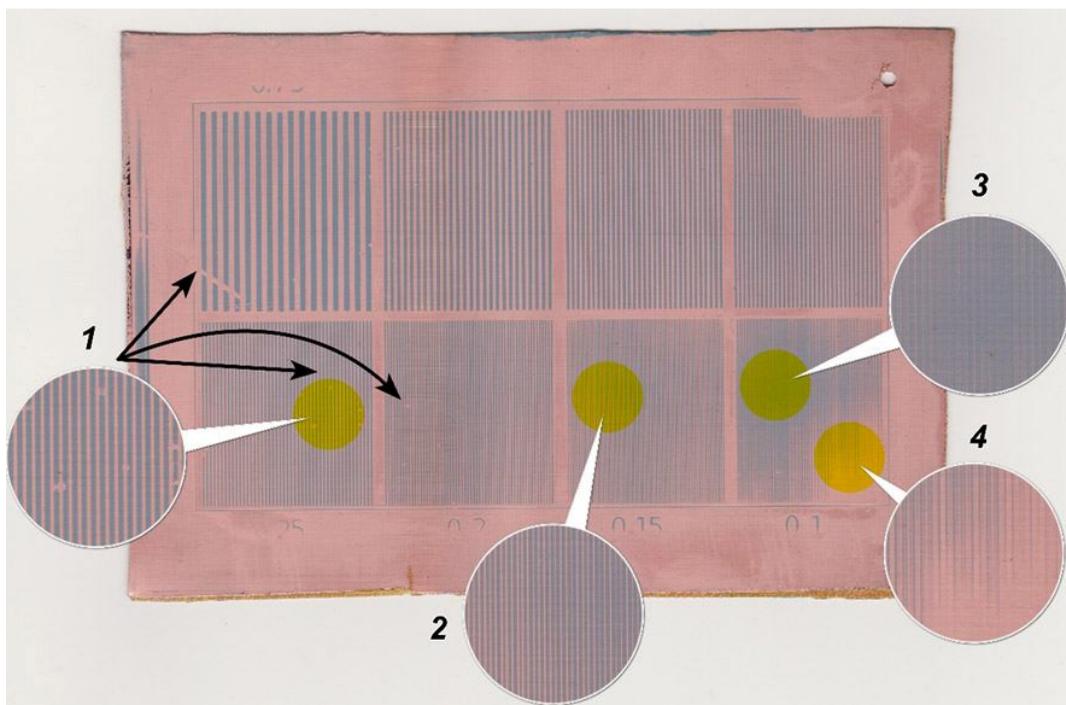


Рис. 9. Виды дефектов, полученных после экспонирования с помощью прототипа

Полученные результаты позволяют сделать предположение о возможности замены классических систем контактного и прямого экспонирования рассматриваемой системой в технологических процессах производства ПП. Чтобы проверить выдвинутое предположение, изготовлен тестовый образец печатной платы.

ИЗГОТОВЛЕНИЕ ТЕСТОВОГО ОБРАЗЦА

Для изготовления тестового образца выбрана светодиодная матрица с длиной волны 365 нм, т.к. она показала лучшие результаты воспроизведения проводящего рисунка, время экспонирования — 120 с, время проявки — 60 с. Используемый для изготовления образца материал — двусторонний фольгированный стеклотекстолит FR-4, толщина базового материала составляет 0.5 мм, а толщина фольги — 35 мкм.

Для создания проводящего рисунка исследуемого образца использована топология ПП четвертого класса точности по ГОСТ Р 53429-2009 [13]: минимальная ширина проводников и зазоров между ними составляет 0.2 мм. Выбор топологии обусловлен тем фактом, что производство ПП четвертого класса точности наиболее распространено,

в частности выбранные параметры ширины проводника и зазора для материала с толщиной фольги 35 мкм компания "Резонит" определяет как минимальные значения технологических возможностей производства в классе "Стандарт" [14], т.е. без увеличения стоимости изготовления.

В ходе подготовки к испытаниям установки произведена подготовка производственных файлов топологии: выполнено тройное мультиплицирование заготовки (рис. 10), у одного образца утолщена часть проводников. Затем подготовлено изображение фотошаблона и осуществлено масштабирование в соответствии с разрешением ЖК-экрана.

Технологический процесс работы с заготовкой аналогичен описанному ранее с последующим добавлением операций:

1. Окончательная полимеризация фоторезиста в установке контактного экспонирования Bungard Hellas без фотошаблона в течение 15 с.

2. Струйное травление с помощью установки Bungard Splash в растворе персульфата аммония с визуальным контролем результата травления каждые 30 с.

3. Снятие фотрезиста в растворе гидроксида натрия.

4. Погружная промывка в воде.

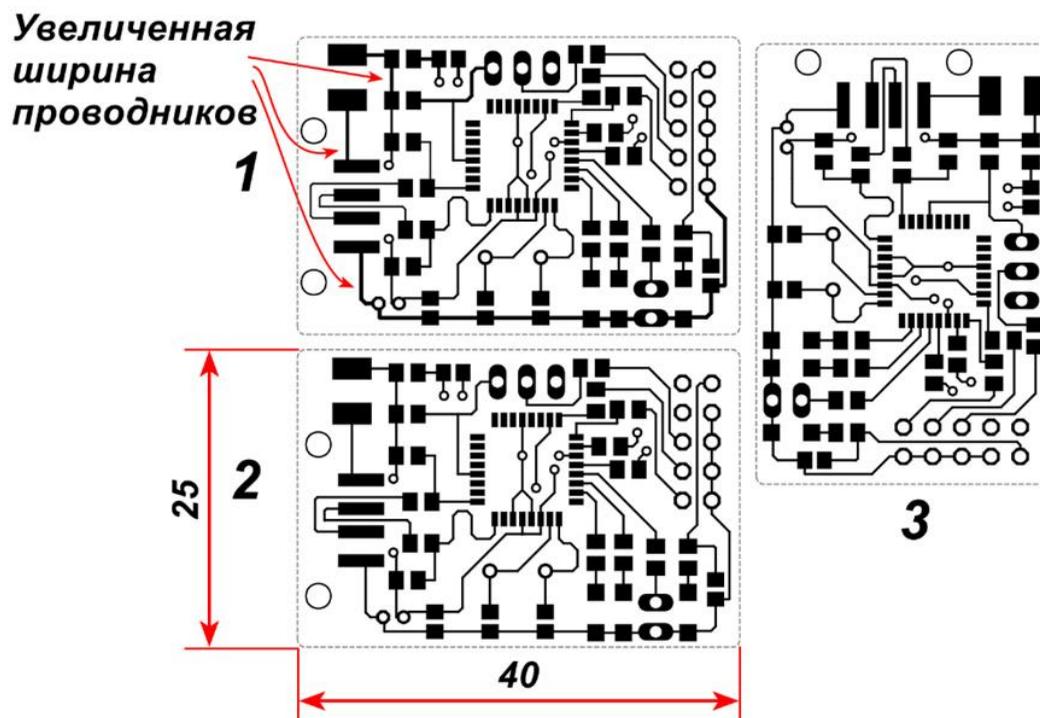


Рис. 10. Позитивное отображение фотошаблона тестового образца

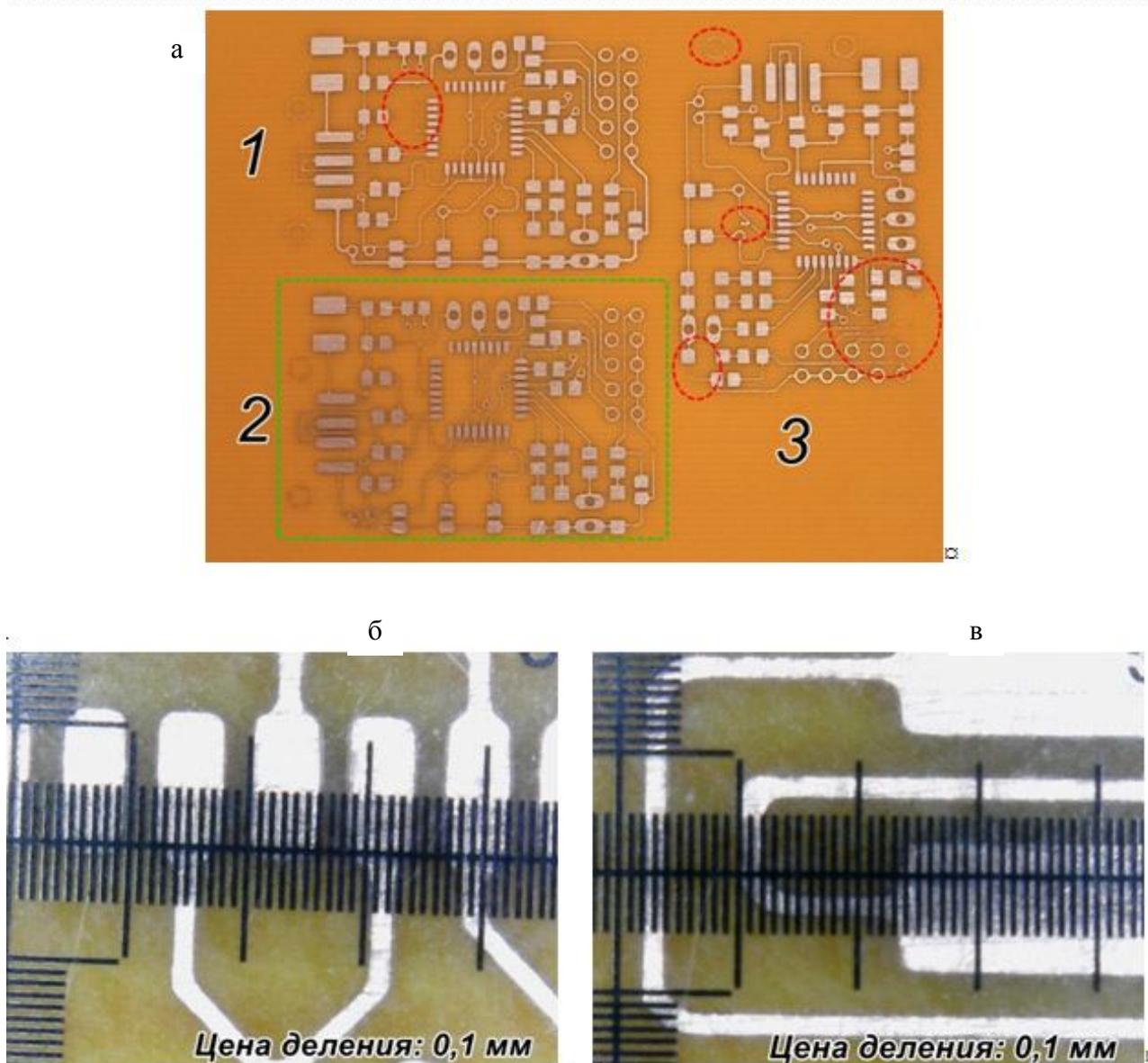


Рис. 11. Тестовый образец после снятия фоторезиста.

На участках 1, 3 овальными границами обозначены области с дефектами; 2 — бездефектная печатная плата; а — общий вид; б, в — участки бездефектной заготовки под микроскопом

На рис. 11, а, представлена полученная топология после травления и снятия фоторезиста. У образцов под номерами 1 и 3 выявлены дефекты (выделены овальными границами) в виде разрывов проводников и наличия остатков меди, которые обусловлены неплотным прилеганием заготовки к экрану. У образца под номером 2 дефекты не выявлены. Бездефектная печатная плата осмотрена под микроскопом (рис. 11, б, в) с применением

калибровочной линейки (цена деления: 0.1 мм). Толщины проводников и размеры контактных площадок компонентов поверхностного монтажа после изготовления совпали с проектируемыми значениями исходного производственного файла.

Таким образом, полученные результаты подтверждают предположение о возможности замены классических систем контактного и прямого экспонирования рассматриваемой системой.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе исследована возможность создания системы прямого экспонирования с применением ЖК-матрицы на основе MSLA-технологии 3D-печати. Спроектирована структурная схема установки контактного экспонирования. Разработан лабораторный стенд установки, реализующий функциональную часть.

Ряд проведенных экспериментов подтвердил принципиальную возможность применения технологии в производственных процессах ПП, а также позволил уточнить параметры конфигурации установки, а именно: вид оптического рассеивателя, расстояние от рассеивателя до ЖК-матрицы и длину волны источника излучения. Оценены также и технологические параметры процесса: время экспонирования и минимальные размеры воспроизводимого проводящего рисунка. Также с использованием предложенной системы изготовлена ПП четвертого класса точности по ГОСТ Р 53429-2009 [13] с минимальной шириной проводников и зазоров между ними 0.2 мм.

В качестве преимуществ системы стоит отметить низкую себестоимость, отсутствие необходимости в изготовлении фотошаблонов, а также большие перспективы для модернизации:

1) возможность компенсации деформации заготовки путем изменения изображения шаблона за счет внедрения системы сканирования [15];

2) увеличение разрешающей способности за счет обеспечения плотного прилегания фоторезиста и определения оптимальных параметров конструкции и технологического процесса;

3) ускорение операции экспонирования: относительно контактных установок — за счет полной автоматизации процесса совмещения шаблона и заготовки, а также относительно полученных результатов — путем совместного использования источника излучения с большей длиной волны и более точной системы контроля времени;

4) полная автоматизация процесса экспонирования и его интеграция с помощью средств цифрового производства в общую систему предприятия [16, 17].

Однако стоит выделить и недостатки системы, среди которых:

1) зависимость точности воспроизведения проводящего рисунка от размера пикселя и разрешенной матрицы;

2) отсутствие на текущий момент времени ЖК-матриц большого размера с высоким разрешением, что накладывает ограничения на размеры изготавливаемых печатных плат или требует разработки многостадийного процесса экспонирования, подразумевающего последовательное экспонирование отдельных участков заготовки.

Таким образом, на основании описанных достоинств и недостатков можно заключить, что подобные системы на данный момент времени могут быть востребованы при единичном и мелкосерийном производстве печатных плат небольшого размера, а также могут стать отличной альтернативой классическим установкам контактного экспонирования.

Работа выполнена в рамках гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых – кандидатов наук (МК-582.2022.4).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ванцов С.В., Медведев А.М. Надежность входного контроля // Надежность и качество сложных систем. 2015. № 4 (12). С. 91–100. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=25515024>
2. Васильев Ф.В., Ванцов С.В., Медведев А.М., Степанова М.А., Хомутская О.В. Оценка надежности непаяных прессовых соединений по омическому сопротивлению // Надежность и качество сложных систем. 2016. № 3 (15). С. 85–91. DOI: 10.21685/2307-4205-2016-3-13
3. Исаев В. Взаимосвязь параметров, влияющих на надежность печатных плат // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. 2020. № 5 (196). С. 128–137. DOI: 10.22184/1992-4178.2020.196.5.128.134
4. Vantsov S.V., Vasil'ev F.V., Medvedev A.M., Khomutskaya O.V. Quasi-determinate model of thermal phenomenon in drilling laminates // Russian engineering research. 2018. Vol. 38, no. 12. P. 1074–1076. DOI: 10.3103/S1068798X18120316
5. Можаров В.А., Хомутская О.В. Влияние нефункциональных контактных площадок на различные характеристики печатных плат // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. 2017. № 3 (163). С. 166–176. DOI: 10.22184/1992-4178.2017.163.3.166.176
6. Сокольский А.М., Сокольский М.Л. Анализ факторов, влияющих на интенсивность электрохимической миграции // Труды МАИ. 2016. № 90. С. 17–17. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=27540410>.
7. Сокольский А., Сокольский М. О предотвращении электрохимической миграции в печатных платах авионики // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. 2017. № 9 (170). С. 116–124. DOI: 10.22184/1992-4178.2017.170.9.116.124
8. Ванцов С.В., Медведев А.М., Маунг-Маунг З., Хомутская О.В. Анализ процесса сверления отверстий в композиционных материалах оснований печатных плат // Надежность и качество сложных систем. 2016. № 2 (14). С. 37–44. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=26024122>
9. Исаев В.В., Коробков М.А. Влияние параметров проектирования и технологических процессов на вероятность появления дефектов на печатных платах // Тезисы 19-й Международной конференции

- "Авиация и космонавтика", Москва, 23–27 ноября 2020. С. 265–267.
URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=44580770&pff=1>
10. Платы печатные: Справочник / под редакцией К.Ф. Кумбза. В 2-х книгах. Книга 1. М.: Техносфера, 2011. 1016 с.
11. *Orzel, B., Stecula, K.* Comparison of 3D Printout Quality from FDM and MSLA Technology in Unit Production // *Symmetry*. 2022. Vol. 14, is. 5. Id. 910.
DOI: 10.3390/sym14050910
12. *Khomutskaya O.V., Medvedev A.M., Korobkov M.A., Vancov S.V.* The method of automated evaluation of the deformation of the printed circuit board // 2021 6th International Conference on Communication and Electronics Systems (ICCES). P. 510–512.
DOI: 10.1109/ICOECS52783.2021.9657420
13. ГОСТ Р 53429-2009. Платы печатные. Основные параметры конструкции. М.: Стандартинформ, 2018.
14. Резонит. Многослойные печатные платы. Технологические возможности производства. Электронный ресурс. URL: <https://www.rezonit.ru/pcb/mnogosloynye-platy-tipovye-sborgki/> (Дата обращения: 27.09.2022).
15. *Куликов Н., Хомутская О., Ванцов С.* Цифровой метод автоматизированной оценки деформации печатной платы // *Электроника: Наука, Технология, Бизнес*. 2018. № 2 (173). С. 186–191. DOI: 10.22184/1992-4178.2018.173.2.186.191
16. *Коробков М.А., Васильев Ф.В.* Применение искусственного интеллекта в управлении технологическими процессами // Тезисы докладов 20-й Международной конференции "Авиация и космонавтика", Москва, 22–26 ноября 2021 года. С. 233–234.
17. *Коробков М.А.* Исследование проблем создания цифрового производственного участка // Сборник тезисов работ XLVII Международной молодежной научной конференции, Москва, 20–23 апреля 2021. С. 311–312.
URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=46258855&pff=1>

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва

Контакты: *Хомутская Ольга Владиславовна*,
khomutskayaov@gmail.com

Материал поступил в редакцию 20.12.2022

DIRECT EXPOSURE SYSTEM BASED ON A LIQUID CRYSTAL DISPLAY

M. A. Korobkov, V. D. Zajkin, E. S. Mareichev, O. V. Khomutskaya, F. V. Vasiliev

Moscow Aviation Institute (National Research University), Russian Federation

The paper investigates the possibility of using liquid crystal displays (LCDs) as photomasks for transferring a conductive pattern to a photosensitive material using ultraviolet light in the workflow of printed circuit boards (PCBs). In the course of the study, an analysis of the exposure technologies used in the PCB workflow was carried out. A block diagram of the direct exposure system with the use of LCD has been developed, and the main elements of its design have been determined. Based on the monochrome LCD PengJi PJ3D623V1, a prototype of the exposure device was created, on which a number of experiments were carried out. During the experiments, the following design parameters of the device were clarified: the type of lens (with frosted glass), the distance between the lens and the LCD (37 mm), the wavelength of the ultraviolet light source (365 nm). The experiments also allowed us to determine the manufacturing parameters of the exposure operation: the required exposure time for sources with various wavelengths, the minimum reproducible dimensions of the conductive pattern (conductor width and spacing). The possibility of using the developed system has been confirmed: a PCB corresponding to the fourth accuracy class according to GOST R 53429-2009 with a minimum width of 0.2 mm conductors and spaces has been successfully manufactured (thickness of the copper foil is 35 μm). The advantages and disadvantages of the system are analyzed, on the basis of which the scope of possible applications of the technology under study is determined, as well as the prospects for its development.

Keywords: direct exposure, printed circuit boards manufacturing processes, liquid crystal matrix

INTRODUCTION

Currently, the rapid development of information technologies is the reason for the increase in demand for electronic devices, which entails the need to increase the volume of manufactured products, reduce the time for their manufacture, increase the reliability [1–3], minimize the number of defective products [4–6]. It is possible to solve the assigned tasks by improving technological processes [7].

In the manufacture of printed circuit boards (PCBs), one of the most important manufacturing steps is transferring the conductive pattern to the workpiece by applying a photosensitive material to the latter and then exposing it to ultraviolet (UV) radiation, i.e., the exposure step. It is the exposure step that, to a greater extent, determines the minimally reproducible parameters of the PCB conductive pattern and affects the occurrence of defects in the production. On the one hand, during the exposure step, one can try to eliminate defects obtained in previous technological operations, for example, machining [8]. On the other hand, the exposure operation itself can be a source of defects [9], which are hard to detect and often occur in subsequent stages, for example, after etching the workpiece.

Currently, among exposure setups, there is no golden mean as such. There are setups on the market that have a high cost and accuracy of conductive pattern

reproduction, and there are cheap setups that allow the manufacture of low-grade PCBs. Therefore, there is a need to find new solutions that will have a low cost but still provide sufficient performance to produce current-level printed circuit boards.

ANALYSIS OF EXPOSURE TECHNOLOGIES IN PCB MANUFACTURING

At the moment, the following exposure technologies are common in the production of PCBs: contact, non-contact with a microgap, and direct exposure technology. Each of them has its advantages and disadvantages [10].

In contact technology, a film photomask is used to form a pattern, that is in direct contact with the workpiece. The advantages of this method are: the relative cheapness of the required equipment due to the lack of a complex optical system; the simplicity of the process; the steepest characteristic of transmitted energy change between masked and transparent areas of the photomask. The technology also has a large number of drawbacks: the accuracy of the conductive pattern reproduction is determined by the plotter accuracy; the instability of the geometric dimensions of the photomask during changing temperature and humidity, which can lead to distortion of the picture and then to defect; the physical wear of photomask; the labour intensity of combining the photo-

mask and the workpiece during manufacture of double-sided and multilayer PCBs due to deformation of the latter.

Non-contact microgap technology is similar to contact microtechnology. The difference is that a small gap (from 100 to 500 μm) is left between the photomask and the workpiece. The presence of a gap reduces the wear of the photomask but also reduces the fidelity of the pattern due to greater energy dissipation. All other shortcomings of the contact method remain.

In direct exposure technology, a laser, using an optical system, acts on a photosensitive material to form an image. The advantages of this technology are: the complete exclusion of photomasks; the ability to compensate for the deformation of the workpiece by changing the pattern reproduced by the laser; and the ease of combining the conductive pattern and the workpiece. Thus, this technology is devoid of the disadvantages of the two previous methods, but has others: the high cost of the optical system; the dependence of pattern reproduction accuracy on laser beam spot size and the mechanical system, that deflects this beam; the most gentle radiation energy distribution curve, which entails the greatest parasitic illumination of the photoresist and, as a result, a decrease in the accuracy of the reproduced image.

Currently, large enterprises producing PCBs are trying to turn to direct exposure technology, while contact exposure technology is widespread at small enterprises due to the high cost of direct exposure setups. Based on the growing needs of industry in the production and improvement of technological processes, the question arises of the possibility of creating a technology that will combine the advantages of direct and contact exposure technologies. On the part of direct exposure, it is necessary to ensure the absence of film photomasks; the ability to resize the conductive pattern; simple alignment of the conductive pattern and the workpiece. On the part of contact exposure, it is desirable to obtain the absence of a complex optical system and, as a result, a low device cost.

EXPOSURE SETUP DEVELOPMENT

A process similar to exposure is also found in 3D printing, namely in the technology of mask stereolithography (MSLA) [11].

MSLA technology uses an optical system consisting of a UV radiation source and LCD matrix. The screen sequentially receives the image of the layers of the manufactured model. The liquid photopolymerizable composition solidifies under UV light. The moving platform with the layer formed on it then rises higher to polymerize the next layer.

Thus, MSLA 3D printers provide selective polymerization, which makes it possible to make an as-

sumption about the possibility of using this principle when exposing a photosensitive material in the production of PCBs: to affect the workpiece with UV light passing through the LCD matrix on which the image of the conductive pattern is located. Based on the above technology, a structural diagram of the exposure system using an LCD matrix was developed (Fig. 1).

Fig. 1. Structural diagram of the exposure system

The system includes three main components:

1. The control system consists of a personal computer (PC) and a scanning module. The scanner receives an image of one side of the workpiece with holes drilled in it and transmits it to a PC. The PC provides control of the scanner and other systems, namely, the exposure system and the holding system, and also processes the image of the workpiece received from the scanner [12]. Based on the analysis of hole offsets relative to the construction documentation files, the PC resizes the image of the conductive pattern to ensure the best alignment of the latter with the workpiece.

2. The exposure system consists of the LCD matrix control subsystem and the UV matrix control subsystem. The LCD control subsystem receives a corrected image of the conductive pattern from the PC control program. UV matrix control subsystem, by command of the control program, provides the required exposure time. Also, between the UV and LCD matrices, it is necessary to have a diffuser that ensures the parallelism of UV rays and, accordingly, the uniform distribution of exposure energy throughout the workpiece.

3. The holding system provides tight contact between the LCD matrix and the workpiece during exposure. In this case, it is advantageous to use the vacuum pressing technique used in the contact exposure setups. The workpiece with the applied photosensitive material is located on the LCD matrix and is covered with a holder made of a transparent polymer film. Then, a vacuum is created between the matrix and the film with the help of a pump to press the workpiece against the matrix.

Based on the developed structural diagram (Fig. 1), the principle of operation of the exposure setup is proposed and shown in Fig. 2.

Fig. 2. Principle of operation of the exposure setup

The operator places the workpiece with the applied photoresist on the LCD screen and covers it from above with a frame with a holding film. Then the necessary pressing of the workpiece is provided by pumping air out, the upper side of the workpiece is scanned, and based on the results of the scan, the image of the conductive pattern is changed. At the last stage, the image is displayed on the LCD matrix, the radiation source is turned on for the required time, and then the holding system is turned off.

The developed structural diagram and the stated principle of operation in general form describe the possibility of using an LCD matrix for PCB exposure. However, a large number of specific questions remain regarding the design of the setup, the technological parameters of the operation, and, more importantly, the fundamental performance of the technology: can the LCD screen sufficiently mask the photoresist under it? Thus, there is a need for an experimental study and technology testing.

EXPERIMENTAL STUDIES

Equipment, materials, methods

A laboratory prototype (Fig. 3) without a scanning module, and with a simplified system for holding the workpiece, was developed to fundamentally check the operability of the proposed exposure method.

Fig. 3. Laboratory prototype of the exposure setup. a — exposure module; б — full prototype

The prototype of the exposure setup is assembled using the following basic components:

- PC;
- 6.23-inch monochrome TFT LCD matrix PengJi PJ3D623V1c with a resolution of 3840×2400 pixels and a pixel size of $35 \times 35 \mu\text{m}$;
- image output board with HDMI interface;
- 5 V, 3 A LCD matrix power supply unit;
- LED UV matrix with wavelengths of 365, 385, and 395 nm;
- UV matrix power driver;
- 12V, 5A UV matrix power supply;
- matte and glossy scattering lenses.

To solve the problems identified earlier, it is proposed to conduct experiments aimed at clarifying the design parameters, namely, determining the type of diffuser lens and the required distance between the diffuser and the matrix. The reproducibility of the conductive pattern is also to be investigated with regard to the exposure time and wavelength of the radiation source.

For all the following experiments, the following sample manufacturing process is defined.

1. Cutting of a 90×70 mm workpiece from double-sided foil glass-textstolite FR-4 with thickness of base material of 0.5 mm and a foil thickness of $35 \mu\text{m}$.
2. Drilling of fabrication holes for workpiece attachment.
3. Mechanical surface deoxidation in Bungard Elektronik RBM 300 BLC brushing machine.
4. Drying and heating the workpiece to 70°C .
5. Application of Ordyl Alpha AM 140 dry film photoresist with the use of a Bungard Elektronik RLM 419p laminator.
6. Exposure of the workpiece on the prototype. To do this, the workpiece was placed on the screen and fixed at the edges with adhesive tape. Then, the image was displayed on the screen, followed by manually turning on the LED matrix for a given time.
7. Developing the photoresist with a soda ash solution using a Bungard Splash jet etching unit at a solution temperature of 30°C . Every 30 s, a visual inspection of the workpiece was carried out for the removal of the photoresist.
8. Jet washing of the workpiece with water.

Experiment 1: Determination of diffuser configuration

Since the uniformity of the distribution of light energy is substantially important in the exposure process, at the first stage, two available matte and glossy lenses were compared (Fig. 4, a, б). For a visual evaluation of scattering, UV light was passed through both lenses onto a white sheet of paper (Fig. 4, в, г).

Fig. 4. Patterns of light scattering depending on the lens. a — matte lens; б — glossy lens; в — scattering of light passed through a matte lens on a sheet of paper; г — scattering of light passed through a glossy lens on a sheet of paper

Fig. 4 shows that the matte lens diffuses the light passing through it to a greater extent while the light passing through the glossy lens leaves a noticeable mesh pattern.

However, when the LCD matrix is positioned directly above the matte lens, the light distribution is still uneven from the source (Fig. 5, a). To reduce this negative effect, two spacer frames, 15 and 22 mm high, are designed, printed on a 3D printer, and installed between the diffuser and the LCD matrix. Then the results of exposure under different conditions were compared: without spacers, with spacer 15 mm, with spacer 22 mm and with two spacers providing the dis-

tance from the diffuser to the matrix 37 mm (Fig. 5). During the experiment, an LED matrix with a wavelength of 395 nm was used, and the exposure time was 30 s.

Fig. 5. Patterns of light scattering depending on the distance between the matte lens and the LCD matrix. а — lens and LCD-matrix are installed closely; б — 15 mm; в — 22 mm; г — 37 mm

From the results obtained, it can be seen that in the absence of spacer frames, the photoresist color is clearly darker, and the mesh pattern formed by light passing through the lens is clearly visible. When using 15 and 22 mm spacer frames individually, a mesh pattern is also visible, but the color of the exposed photoresist acquires a lighter hue. With the use of two spacer frames together, the mesh pattern is practically absent. Based on the results obtained, it was decided to use a matte lens and two spacer frames for further studies.

Experiment 2: Exposure time determination

The purpose of the experiment is to determine the optimal exposure time of the photoresist depending on the wavelength of the LED UV matrix used. For this, the exposed region of the photoresist is divided into 10 sections, each of which has its own exposure time (in s): 10, 15, 20, 25, 30, 45, 60, 75, 90 and 120. First, a completely transparent template was displayed on the LCD screen for 10 s. Then the template was displayed, with one opaque section for another 5 s, then with two for another 5 s and so on. As a result, the exposure sections were sequentially closed from minimum to maximum time.

As a reference, a workpiece with an illuminated photoresist was exposed for 15 s on the Bungard Hellas contact exposure setup. Then, the obtained results were visually compared with the reference. The results of the experiment are presented in Fig. 6.

Fig. 6. Change in the photoresist color depending on the exposure time t_{exp} . а — reference obtained on a Bungard Hellas device; б-г — prototypes with installed radiation sources with wavelength λ equal to 365, 385, 395 nm, respectively. The light dotted line in the figure marks those sections that matched in tone with the standard

The light dotted line in the figure indicates the sections that coincided in tone with the reference. When using an LED matrix with a radiation wavelength of

365 nm, starting from the exposure time of 20 s, sections and the boundaries between them are clearly visible, and the color match is observed at the end of the studied range with an exposure time of 120 s. On 385 and 395 nm LED matrices, color matching is observed at exposure times of 15 and 10 s, respectively. Most of the sections have a darker color than the standard, which indicates excessive exposure time.

Experiment 3: Determination of reproducibility of the conductive pattern

The next experiment is aimed at determining the reproducibility of conductors of different widths and gaps between them. For the experiment, a pattern set was created (Fig. 7) containing sections from the first to the fifth accuracy class according to GOST R 53429-2009 [13].

Fig. 7. Positive display of the photographic pattern used to determine the reproducibility of the conductors (numbers next to the conductive pattern indicate the width of the conductors and the gaps between them in mm)

Since the previous experiment made it possible to obtain only an approximate estimate of the exposure time, the current experiment includes a slight variation in time relative to the one previously defined.

Let's set the step of varying the exposure time:

$$\Delta = \frac{T}{4},$$

where T is the exposure time obtained in the previous experiment. Due to technical limitations, the step of variation is rounded to an integer.

Based on the obtained step of varying Δ , we determine the exposure times t_{exp} , which are used in the experiments: $T - 2\Delta$, $T - \Delta$, T , $T + \Delta$, $T + 2\Delta$. Such an approach reduces the inaccuracy of determining the obtained exposure time T .

Obtained experimental results are presented in Tab.

Tab. Reproducibility of conductors depending on wavelength of λ radiation source and exposure time of t_{exp}

The best exposure results for UV matrices with various λ wavelengths are shown in Fig. 8.

The best reproducibility result of the conductive pattern was shown by a matrix with a radiation wavelength of 365 nm at an exposure time of 120 s. With this configuration, it was possible to produce a pattern

set that has a conductor width and a gap of 0.15 mm, and corresponds to the fourth accuracy class according to GOST R 53429-2009 [13]. Matrices with wavelengths of 385 and 395 nm showed equal reproducibility of conductors up to 0.2 mm at exposure times of 11 and 7 s, respectively.

Fig. 8. Results of conductors reproducibility (cells with satisfactory results are circled in white dotted line):

а) $\lambda = 365$ nm, $t_{\text{exp}} = 120$ s; б) $\lambda = 385$ nm, $t_{\text{exp}} = 11$ s;
в) $\lambda = 395$ nm, $t_{\text{exp}} = 7$ s

Consider the present defects on the example of a sample obtained using a 365 nm UV matrix and an exposure time of 120 s (Fig. 9, the defects are numbered 1–4).

Fig. 9. Types of defects obtained after exposure using the prototype

The presence of exfoliating pieces of the photoresist due to poor-quality deoxidation of the workpiece surface and, as a result, low adhesion between the photoresist and the workpiece, was revealed (Fig. 9, 1). The narrowing of the gap between the tracks due to uneven radiation occurred due to a rough determination of the distance from the diffuser to the LCD screen, which resulted in insufficiently uniform radiation (Fig. 9, 2). The simultaneous partial absence of photoresist (Fig. 9, 3) and the presence of oversolidified photoresist (Fig. 9, 4) are caused by different distances from the workpiece to the LCD matrix, which is a consequence of the loose fit of the workpiece. As a result of the analysis of defects, it can be concluded that the cause of the defects obtained is either other manufacturing operations, or inaccuracies in determining the design parameters, which can be eliminated by conducting additional studies.

Thus, as a result of the experiments, it was primarily possible to fundamentally assess the possibility of transferring the conductive pattern to the workpieces by direct exposure using an LCD matrix. Also, the experiments carried out made it possible to clarify both the design parameters for the prototype of the exposure setup and the parameters of the manufacturing operation:

1. As a source of UV light, it is advisable to use LED matrices with a wavelength of 365 nm, because a long exposure time makes it possible to more accurately transfer the required amount of energy to the photoresist for polymerization, as well as to increase the maximum time deviations for defect-free expo-

sure. However, after a more accurate determination of the parameters, the operation time can be significantly reduced in the case of the use of a radiation source with a long wavelength while controlling the exposure time with an accuracy of milliseconds.

2. Better light scattering occurs when a matte lens is used and the distance between the lens and the LCD screen is equal to 37 mm, i.e., when 22 and 15 mm high spacer frames are used together.

3. At the exposure time of 120 s, it was possible to reproduce the pattern with the parameters of the minimum conductor width and the gap between the conductors equal to 0.15 mm.

The obtained results make it possible to make an assumption about the possibility of replacing classical contact and direct exposure systems with the system under consideration in PCB production. To verify this assumption, a test sample of the PCB was made.

MANUFACTURE OF TEST SAMPLE

For the manufacture of the test sample, a LED matrix with a wavelength of 365 nm was chosen, since it showed the best results in the reproduction of the conductive pattern, the exposure time is 120 s, the development time is 60 s. The material used for the manufacture of the sample is double-sided foil fiberglass FR-4, the thickness of the base material is 0.5 mm, and the thickness of the foil is 35 μm .

To create a conductive pattern on the test sample, the PCB pattern set of the fourth accuracy class according to GOST R 53429-2009 [13] was used: the minimum width of the conductors and the gaps between them are 0.2 mm. The choice of pattern set is due to the fact that the production of PCBs of the fourth accuracy class is most common, in particular, the selected parameters of the conductor width and gap for a material with a foil thickness of 35 μm are defined by Rezonit LTD as the minimum values of production capabilities in the Standard class [14], i.e., without increasing the manufacture cost.

While arranging the setup tests, the production files of the pattern set were prepared: a triple multiplication of the workpiece was made (Fig. 10), one sample had a thickened part of the conductors. Then the image of the photomask is prepared and resized according to the resolution of the LCD screen.

Fig. 10. Positive display of the test sample photomask

The manufacturing workflow is the same as previously described, followed by the addition of:

1. Final polymerization of the photoresist in the Bungard Hellas contact exposure unit without a photomask for 15 s.

2. Jet etching with a spray etcher Bungard Splash in ammonium persulfate solution, checking the etching result visually every 30 s.

3. Removal of photoresist in sodium hydroxide solution.

4. Submersible flushing in water.

Fig. 11, a, shows the resulting set after etching and removal of the photoresist. Samples 1 and 3 have defects (marked by oval boundaries) in the form of broken conductors and the presence of copper residues, which are caused by a loose fit of the workpiece to the screen. Sample number 2 showed no defects. A defect-free printed circuit board was examined using a calibration ruler (scale value: 0.1 mm) under a microscope (Fig. 11, б, в). The wire thicknesses and pad sizes of the surface mount components after fabrication matched the design values of the original manufacturing file.

Fig. 11. Test sample after removal of photoresist. In sections 1, 3 the oval boundaries indicate areas with defects; 2 — defect-free printed circuit board; а — general view; б, в — areas of defect-free PCB under microscope

The results obtained support the hypothesis that the system under consideration could take the place of traditional contact and direct exposure systems.

CONCLUSION

The work investigated the possibility of creating a direct exposure system using an LCD matrix based on MSLA 3D printing technology. The structural diagram of the contact exposure setup is designed. A laboratory bench has been developed, that performs the functionality of the setup.

A number of experiments carried out confirmed the fundamental possibility of using the technology in PCB production, and also made it possible to clarify the configuration parameters of the setup, namely: the type of optical diffuser, the distance from the diffuser to the LCD matrix and the wavelength of the radiation source. The following workflow parameters were also evaluated: exposure time and minimum dimensions of the reproducible conductive pattern. Using the proposed system, a PCB of the fourth accuracy class (GOST R 53429-2009 [13]) was manufactured, with a minimum width of conductors and gaps between them of 0.2 mm.

As advantages of the system, it is worth noting the low cost, the lack of need for the manufacture of photomasks, as well as great prospects for modernization:

1) ability to compensate for workpiece deformation by changing pattern due to implementing a scanning system [15];

2) enhanced resolution by making sure the photoresist fits snugly and choosing the best structure and workflow settings;

3) acceleration of the exposure operation:

– in comparison to contact setups, due to the complete automation of the pattern and the workpiece combination process,

– in comparison to the results obtained, by using a common radiation source with a long wavelength and a more accurate time control system;

4) complete automation of the exposure process and its integration into the general system of the enterprise by means of digital production [16, 17].

However, it is worth highlighting the shortcomings of the system, including:

1) dependence of the reproduction accuracy of the conductive pattern on the pixel size and the resolution of the matrix;

2) the current absence of large-size, high-resolution LCD matrices, which imposes restrictions on the size of printed circuit boards being manufactured or requires the development of a multi-stage exposure process involving sequential exposure of individual portions of the workpiece.

Thus, based on the advantages and disadvantages described, it can be concluded that such systems, at this moment in time, can be in demand in the one-off and small-scale production of small-size printed circuit boards, and can also be an excellent alternative to classic contact exposure setups.

REFERENCES

1. Vantsov S.V., Medvedev A.M. [Reliability of incoming inspection]. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem* [Reliability and quality of complex systems], 2015, no. 4 (12), pp. 91–100. (In Russ.).
URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=25515024>
2. Vasil'ev F.V., Vantsov S.V., Medvedev A.M., Stepanova M.A., Chomutskaya O.V. [Evaluation of reliability of non-soldered press joints by ohmic resistance]. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem* [Reliability and quality of complex systems], 2016, no. 3 (15), pp. 85–91. DOI: 10.21685/2307-4205-2016-3-13 (In Russ.).
3. Isaev V. [Relationship of parameters affecting printed circuit board reliability]. *Elektronika: Nauka, Tekhnologiya, Biznes* [Electronics: Science, Technology, Business], 2020, no. 5 (196), pp. 128–137. (In Russ.). DOI: 10.22184/1992-4178.2020.196.5.128.134

4. Vantsov S.V., Vasil'ev F.V., Medvedev A.M., Khomutskaya O.V. Quasi-determinate model of thermal phenomenon in drilling laminates. *Russian engineering research*, 2018, vol. 38, no. 12, pp. 1074–1076. DOI: 10.3103/S1068798X18120316
5. Mozharov V.A., Chomutskaya O.V. [Impact of non-functional pads on different PCB characteristics]. *Elektronika: Nauka, Tekhnologiya, Biznes* [Electronics: Science, Technology, Business], 2017, no. 3 (163), pp. 166–176. (In Russ.). DOI: 10.22184/1992-4178.2017.163.3.166.176
6. Sokol'skiy A.M., Sokol'skiy M.L. [Analysis of factors affecting electrochemical migration intensity]. *Trudy MAI* [Proceedings of the Moscow Aviation Institute], 2016, no. 90, pp. 17–17. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=27540410>.
7. Sokol'skiy A., Sokol'skiy M. [On prevention of electrochemical migration in avionics printed circuit boards]. *Elektronika: Nauka, Tekhnologiya, Biznes* [Electronics: Science, Technology, Business], 2017, no. 9 (170), pp. 116–124. (In Russ.). DOI: 10.22184/1992-4178.2017.170.9.116.124
8. Vantsov S.V., Medvedev A.M., Maung-Maung Z., Chomutskaya O.V. [Analysis of hole drilling process in composite materials of printed circuit board bases]. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem* [Reliability and quality of complex systems], 2016, no. 2 (14), pp. 37–44. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=26024122> (In Russ.).
9. Isaev V.V., Korobkov M.A. [Impact of design and process parameters on the probability of defects on printed circuit boards]. *Tezisy 19-y Mezhdunarodnoy konferentsii "Aviatsiya i kosmonavtika", Moskva, 23–27 noyabrya 2020* [Theses of the 19th International Conference "Aviation and Cosmonautics," Moscow, November 23–27, 2020], pp. 265–267. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=44580770&pf=1>
10. Ed. K.F. Kumbza. *Platy pechatnye: Spravochnik* [Printed boards: Reference book] v 2-ch knigach. Kniga 1. Moscow, Technosfera Publ., 2011. 1016 p. (In Russ.).
11. Orzel, B., Stecula, K. Comparison of 3D Printout Quality from FDM and MSLA Technology in Unit Production. *Symmetry*, 2022, vol. 14, is. 5, id. 910. DOI: 10.3390/sym14050910
12. Khomutskaya O.V., Medvedev A.M., Korobkov M.A., Vantsov S.V. The method of automated evaluation of the deformation of the printed circuit board. *2021 6th International Conference on Communication and Electronics Systems (ICCES)*, pp. 510–512. DOI: 10.1109/ICOECS52783.2021.9657420
13. *GOST R 53429-2009. Platy pechatnye. Osnovnye parametry konstruktsii* [GOST R 53429-2009. Printed boards. Basic design parameters]. Moscow, Standartinform Publ., 2018.
14. *Rezonit. Mnogosloynnye pechatnye platy. Technologicheskie vozmozhnosti proizvodstva* [Resonates. Multilayer printed circuit boards. Technological capabilities of production]. (In Russ.). URL: <https://www.rezonit.ru/pcb/mnogosloynnye-platy-tipovye-sborki/>
15. Kulikov N., Chomutskaya O., Vantsov S. [Digital method for automated evaluation of PCB deformation]. *Elektronika: Nauka, Tekhnologiya, Biznes* [Electronics: Science, Technology, Business], 2018, no. 2 (173), pp. 186–191. (In Russ.). DOI: 10.22184/1992-4178.2018.173.2.186.191
16. Korobkov M.A., Vasil'ev F.V. [Application of artificial intelligence in process control]. *Tezisy dokladov 20-y Mezhdunarodnoy konferentsii "Aviatsiya i kosmonavtika", Moskva, 22–26 noyabrya 2021* [Abstracts of reports 20th International Conference "Aviation and Cosmonautics," Moscow, November 22–26, 2021], pp. 233–234. (In Russ.).
17. Korobkov M.A. [Digital Manufacturing Site Challenge Study]. *Sbornik tezisov rabot XLVII Mezhdunarodnoy molodezhnoy nauchnoy konferentsii, Moskva, 20–23 aprelya 2021* [Collection of theses of the XLVII International Youth Scientific Conference, Moscow, April 20–23, 2021], pp. 311–312. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=46258855&pf=1>

Contacts: *Khomutskaya Olga Vladislavovna*,
 khomutskayaov@gmail.com

Article received by the editorial office on 20.12.2022