

Научная статья

УДК 621.389

URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=176848>

МЕТОД МАСОЧНОЙ КОМПЕНСАЦИИ НЕРАВНОМЕРНОСТИ ИЗЛУЧЕНИЯ В СИСТЕМЕ ПРЯМОГО ЭКСПОНИРОВАНИЯ НА ОСНОВЕ ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ МАТРИЦЫ

Максим Андреевич Коробков¹✉, Вадим Дмитриевич Зайкин²

^{1,2}Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), МАИ, Москва, Россия

¹josef_turok@bk.ru ✉

²dvorfin@yandex.ru

Аннотация. Работа посвящена решению проблемы неравномерности ультрафиолетового излучения в лабораторном прототипе установки прямого экспонирования на основе жидкокристаллической матрицы при производстве печатных плат для повышения надежности технологической операции экспонирования. Предложен метод компенсации неравномерности излучения при помощи маски, т.е. наложения дополнительного изображения с разной степенью прозрачности на отображаемый жидкокристаллической матрицей рисунок. В ходе работы формализован алгоритм создания компенсирующей маски с помощью оценки изменения цвета фоторезиста и проведено экспериментальное исследование, подтвердившее эффективность использования предложенного метода.

Ключевые слова: прямое экспонирование, технологические процессы производства печатных плат, жидкокристаллическая матрица, надежность технологических процессов производства печатных плат

Финансирование: работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, грант № 23-29-10204

Для цитирования: Коробков М.А., Зайкин В.Д. Метод масочной компенсации неравномерности излучения в системе прямого экспонирования на основе жидкокристаллической матрицы // Труды МАИ. 2023. № 132. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=176848>

Original article

MASK-ASSISTED RADIATION EQUALIZATION METHOD IN THE LIQUID CRYSTAL MATRIX DIRECT EXPOSURE SYSTEM

Maksim A. Korobkov¹, **Vadim D. Zajkin²**

^{1,2}Moscow Aviation Institute (National Research University), MAI,

Moscow, Russia

¹josef_turok@bk.ru

²dvorfin@yandex.ru

Abstract. The paper investigates the possibility of using liquid crystal displays as photomasks for transferring a conductive pattern to a photosensitive material using ultraviolet light in the manufacturing processes of printed circuit boards. The work is devoted to solving the problem of non-uniformity of ultraviolet radiation in the laboratory

prototype of the direct exposure machine based on the liquid crystal matrix in the production of printed circuit boards to improve the reliability of the exposure operation.

The method of equalization of radiation by using a compensating mask is proposed. It involves overlaying an additional image with different transparency rates on the pattern displayed by the liquid crystal matrix. Transparency of the mask should be selected in such a way that after exposure in each point of the working field the shade of the photoresist color is the same and coincides with the lightest part of it.

In the work, an algorithm for creating a compensating mask by evaluating the color change of photoresist was formalized and an experimental study was carried out, which confirmed the effectiveness of the proposed method. The analysis of the histograms of the brightness of the green component of the images obtained with and without the application of the masking template showed a 51% reduction in the standard deviation. Thus, the considered method allowed us to significantly reduce the problem of non-uniformity of ultraviolet radiation distribution in the prototype of the direct exposure unit, which made it possible to increase the reliability of the technological operation of exposure using the developed unit.

Keywords: direct exposure, printed circuit board manufacturing processes, liquid crystal matrix, reliability of manufacturing processes

Funding: this work was supported by a grant from the Russian Science Foundation, projects № 23-29-10204

For citation: Korobkov M.A., Zajkin V.D. Mask-assisted radiation equalization method in the liquid crystal matrix direct exposure system. *Trudy MAI*, 2023, no. 132. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=176848>

Введение

Производство печатных плат (ПП) [1–4] включает в себя много технологических операций, но наиболее важной, трудной и дорогой является операция переноса рисунка топологии на заготовку — экспонирование. Существующие на данный момент установки экспонирования имеют ряд недостатков [5, 6]. Для установок контактного экспонирования основными недостатками являются: зависимость точности воспроизводимого рисунка от точности плоттера; физическое изнашивание фотошаблонов; трудоемкость позиционирования фотошаблонов в силу их нестабильности от параметров окружающей среды (температуры и влажности). Установки же прямого экспонирования за счет наличия сложных оптических и механических систем достаточно дороги.

В настоящее время на малых предприятиях, производство ПП на которых является скорее побочным продуктом, нежели основной задачей, распространены бюджетные установки контактного экспонирования, которые не позволяют производить высококачественные устройства. Таким образом, в данном случае можно выделить проблему влияния надежности технологических процессов на надежность изготавливаемых электронных средств [7–12].

Исходя из растущих потребностей промышленности в производстве и усовершенствовании технологических процессов [13–16], 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 корректировки 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.

В ходе проведенного ранее исследования [17] описана технология прямого экспонирования, в котором в качестве фотошаблона выступает жидкокристаллическая (ЖК) матрица. Принцип технологии основан на технологии масочной стереолитографии (MSLA), применяющейся в 3D-печати [18–20], и заключается в следующем: заготовка фольгированного стеклотекстолита с нанесенным фоточувствительным материалом (фоторезистом) устанавливается непосредственно на ЖК матрицу, на экран которой выводится изображение проводящего рисунка. Далее заготовка через ЖК матрицу подвергается воздействию ультрафиолетового (УФ) излучения, формируемого светодиодами и коллимируемого рассеивателем. Пример схемы установки прямого экспонирования с использованием ЖК матрицы представлен на рисунке 1.

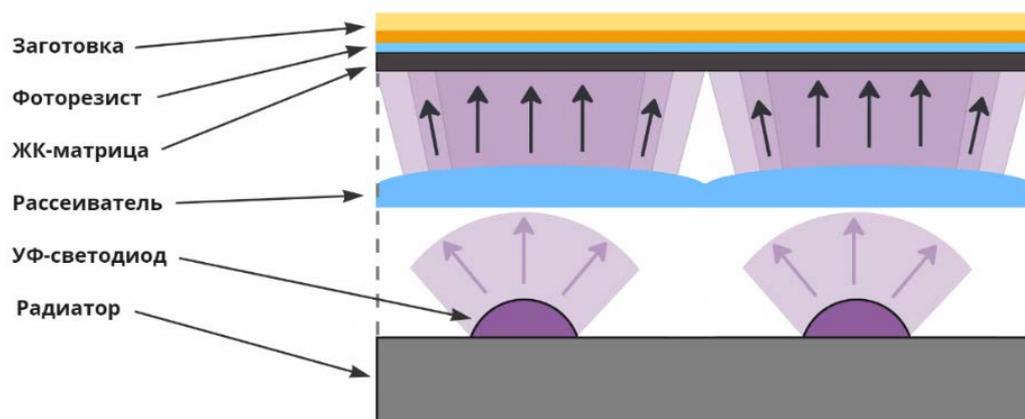
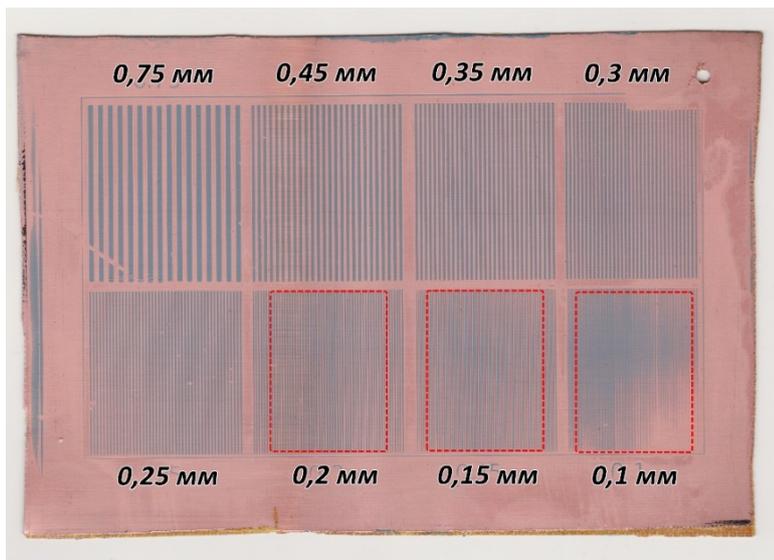


Рисунок 1 — схема установки прямого экспонирования с использованием ЖК матрицы

Главным достоинством технологии по отношению к контактному экспонированию является исключение из производственного процесса пленочных фотошаблонов и, следовательно, всех связанных с их использованием недостатков. Относительно существующих технологий прямого экспонирования предлагаемая технология не предполагает использования сложных оптических и механических систем, что влечет за собой низкую себестоимость подобных установок. К недостаткам технологии относится зависимость точности процесса от размера пикселя, а также небольшой размер рабочего поля установки.

Для реализации предложенной технологии собран лабораторный прототип установки экспонирования на основе монохромного экрана PengJi PJ3D623V1 [21] (размер пикселя: 34 мкм; рабочая область: 134,4 × 84 мм; коэффициент пропускания: 7%) и проведена серия экспериментов, подтвердившая принципиальную работоспособность технологии. Однако, одним из недостатков разработанного прототипа установки является неравномерность полимеризации фоторезиста, что влечет за собой дефекты при изготовлении ПП (рисунок 2, а).



а)



б)

Рисунок 2 — неравномерность полимеризации фоторезиста: а) тестовый образец с четко выраженной неоднородностью полимеризации на участках с шириной линии и зазора от 0,1 до 0,2 мм; б) внешний вид рассеивателя

Неравномерность полимеризации фоторезиста обусловлена неравномерностью попадающего на него излучения. Это связано с типом используемого рассеивателя: он представляет из себя матрицу линз (рисунок 2, б) и в местах их соединения свет проходит в меньшей мере.

Таким образом, одной из существенных проблем технологии экспонирования с использованием ЖК матрицы является неравномерность излучения, вызванная формой используемого рассеивателя. Поэтому актуальной задачей для внедрения систем на основе данной технологии является разработка методов, позволяющих компенсировать неравномерность излучения.

Возможные методы компенсации неравномерности излучения

Для компенсации неравномерности излучения УФ света рассмотрено три метода.

1. Добавление механических перемещений источника излучения с рассеивателем относительно ЖК матрицы для того, чтобы пучок света менял свое положение относительно последней (рисунок 3, а). Этот метод требует существенной модернизации конструкции установки, а также определения параметров колебаний: амплитуды и частоты вибрации. Также создаваемая вибрация может негативно сказаться на сроке службы установки.
2. Увеличение расстояния между рассеивателем и источником света (рисунок 3, б). В таком случае из-за того, что свет из рассеивателя не является полностью коллимированным, то при увеличении расстояния до ЖК матрицы область излучения от одного светодиода увеличится, что уменьшит неравномерность. Однако увеличение расстояния между линзой и ЖК матрицей целесообразно до некоторого предела, так как количество поглощенной фоторезистом энергии обратно пропорционально расстоянию, что влечет за собой увеличение требуемого времени экспонирования.
3. Формирование на экране изображения шаблона, выравнивающего интенсивность прохождения света через ЖК матрицу за счет использования всего диапазона изменения яркости пикселя, а не только его граничных значений: прозрачного и полностью черного (рисунок 3, в). Метод не требует конструктивных изменений установки и не влияет на параметры технологического процесса, но требует определения изображения компенсирующей маски.

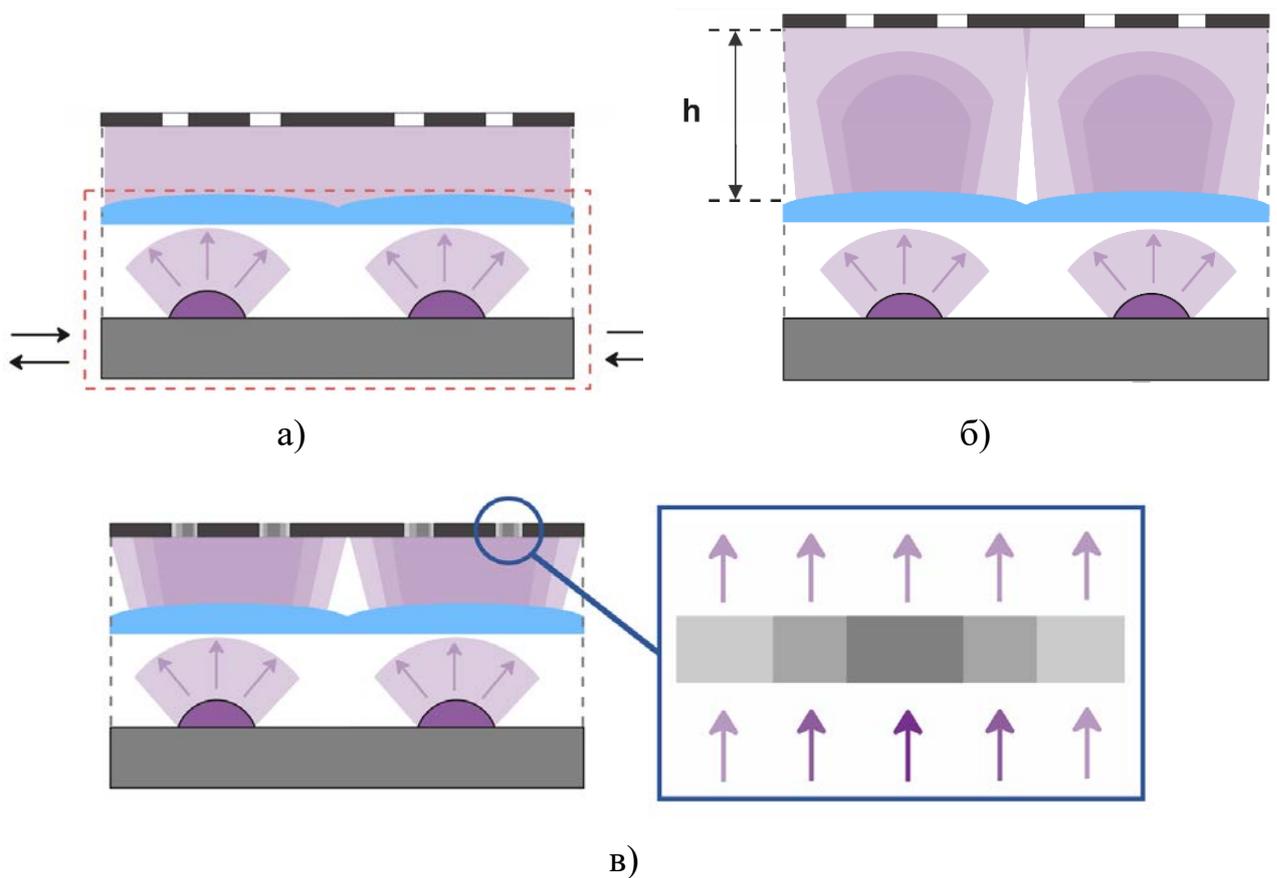


Рисунок 3 — методы компенсации неравномерности излучения: а) движение источника света относительно ЖК матрицы; б) увеличение расстояния между рассеивателем и ЖК матрицей; в) применение компенсирующей маски

Таким образом, наиболее предпочтительным является последний вариант с применением маски, так как его использование не требует внесения изменений ни в конструктивные, ни в технологические параметры установки. Однако его использование требует создания изображения полутоновой маски, получение которой возможно лишь путем получения количественной оценки неравномерности излучения.

С учетом небольших размеров рабочего поля собранного прототипа ($134,4 \times 84$ мм) оценку неравномерности излучения целесообразно проводить путем его сканирования, однако серия пробных экспериментов с использованием

многофункционального устройства HP Deskjet 5520 опровергла возможность использования этого способа по ряду причин.

1. Невосприимчивость чувствительного элемента сканера к свету УФ-диапазона.
2. Засветка изображения встроенной подсветкой сканера. Выключение подсветки невозможно программными методами, а при ее маскировании непрозрачной пленкой съем изображения происходит некорректно.

Также определить неравномерность излучения можно путем измерения энергии, проходящей через ЖК матрицу в различных ее точках, с помощью специальных счетчиков, например, Linshang LS125 [22], но чувствительный элемент таких счетчиков имеет достаточно большие размеры (диаметр отверстия для измерений от 1 до 10 мм). Поэтому этот способ применим только для грубой оценки неравномерности излучения и не подходит для ее компенсации.

Для исследования неравномерности излучения предложен другой способ, который основан на оценке изменения цвета фоточувствительного материала — фоторезиста. Его использование обусловлено доступностью на предприятиях, производящих ПП. В данном случае изменение яркости цвета фоторезиста является косвенным параметром, зависящим от поглощенной им энергии, значение которого можно измерить с помощью сканера. В ходе следующих экспериментов использовался негативный сухой пленочный фоторезист Ordyl Alpha AM 140, который в зависимости от поглощенной им энергии меняет цвет от светло-зеленого до темно-синего. Также важно отметить, что не все фоторезисты изменяют свой

цвет под действием УФ излучения, поэтому не любой фоторезист пригоден для этих целей.

Для коррекции распределения УФ излучения на шаблоне необходимо наложить дополнительную полупрозрачную маску на участки, которые имеют более темный оттенок цвета фоторезиста. Прозрачность маски должна быть подобрана таким образом, чтобы после экспонирования в каждой точке рабочего поля оттенок цвета фоторезиста был одинаковый и совпадал самой светлой его частью. В дальнейшем для оценки цвета фоторезиста производилось его сканирование: разрешение — 1200 dpi, формат — TIFF, цветовое пространство — RGB, глубина цвета — 8 бит. Оттенок фоторезиста определялся совокупностью яркостей красной, зеленой и синей составляющих пикселя от 0 до 255, где 0 соответствует темному оттенку, а 255 — светлому.

Таким образом, для коррекции распределения УФ излучения необходимо сформировать функцию, связывающую необходимую прозрачность маски и яркость цвета изображения фоторезиста. Для этого сначала определена зависимость изменения яркости цвета фоторезиста в зависимости от прозрачности маски. Данную зависимость получена экспериментально: путем экспонирования фоторезиста при различных фиксированных значениях прозрачности маски при одинаковом времени операции. Для проведения экспериментов выбраны следующие значения прозрачности маски (рисунок 4): 100% (полностью прозрачная маска), 87,5%, 75%, 62,5%, 50% (полупрозрачная маска).

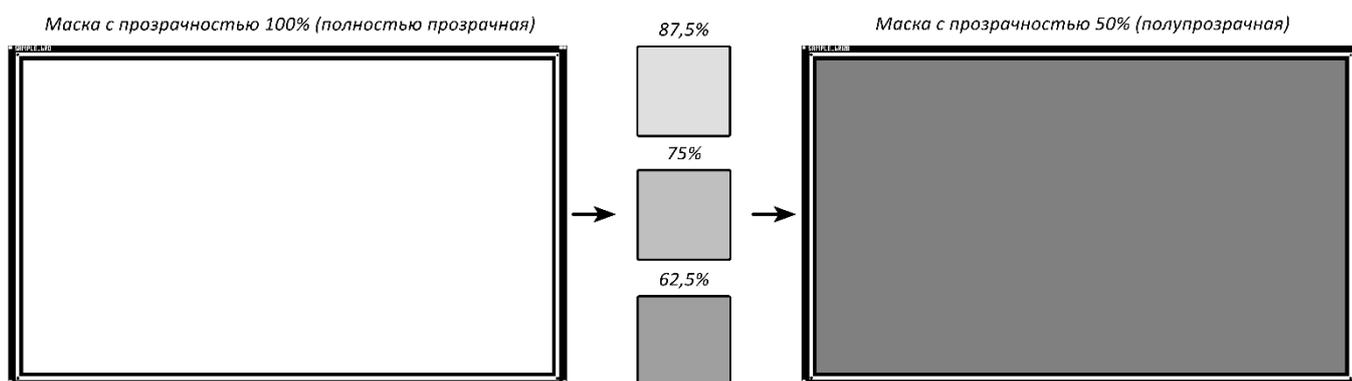


Рисунок 4 — спроектированный набор масок для экспериментов

Эксперименты проводились на лабораторном стенде с УФ светодиодной матрицей, которая имеет длину волны 405 нм; время экспонирования выбрано равным 45 секундам, так как при таком времени наблюдается значительное визуальное изменение цвета фоторезиста.

Анализ изображений фоторезиста

В ходе экспериментов выявлено, что оценка неравномерности излучения по изображениям отсканированного фоторезиста осложняется следующими аспектами (рисунок 5).

1. Наличие дефектов на поверхности фоторезиста, к которым относятся локальные области с меньшей толщиной фоторезиста, которые отличаются по цвету.
2. Наличие инородных объектов на рабочей области сканера.
3. Внесение ошибок в процессе сканирования в виде цифрового шума.
4. Необходимость выделения на изображении участка, соответствующего рабочей области установки, для последующего формирования компенсирующей маски путем сопоставления местоположения пикселей изображения фоторезиста пикселям ЖК матрицы.

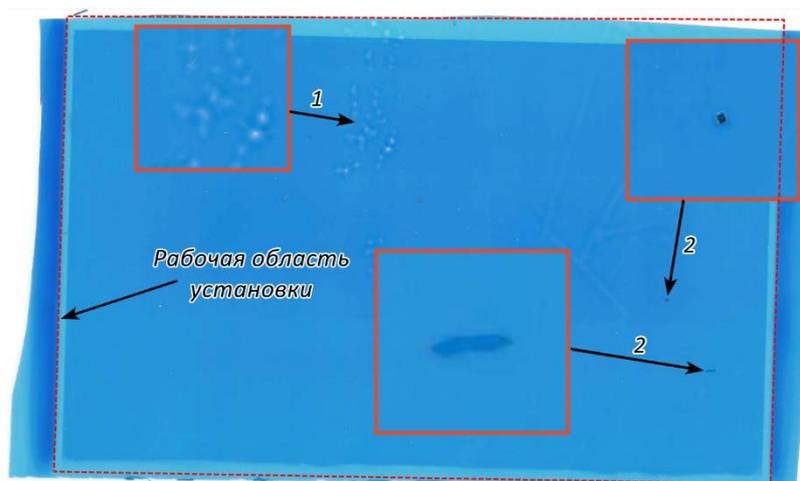


Рисунок 5 — дефекты на изображении фоторезиста: 1 — неравномерность толщины фоторезиста, 2 — наличие инородных частиц на поверхности

Нивелирование влияния дефектов и цифрового шума осуществляется путем усреднения результатов с нескольких изображений. Для этого производится экспонирование 10 заготовок фоторезиста на каждую маску с определенным значением прозрачности. Затем к каждому изображению применяется фильтр Гаусса с ядром в 9 пикселей и среднеквадратическим отклонением яркости равным 3. После производится усреднение (значение яркости пикселя выходного изображения является средним арифметическим пикселей на входной выборке изображений).

В свою очередь, для корректного усреднения требуется вырезать из изображений участки одинакового размера только экспонированной области и наложить их друг на друга, т.е. пиксели с одинаковыми координатами должны показывать результат экспонирования в одном и том же месте ЖК матрицы. Для точного позиционирования полученных изображений на спроектированных масках сделана рамка с реперными знаками по углам. По реперным точкам однозначно определяется положение отсканированного образца, а обрезка производится по внутренней рамке шаблона для исключения влияния цвета рамки на результат. Для

обработки изображений применяется программа, разработанная на языке программирования Python, с применением библиотеки распознавания образов и компьютерного зрения OpenCV.

В процессе анализа изображений [23 – 25] встает проблема распознавания как реперных точек, так и контура рамки фотошаблона. При простой бинаризации изображения сложно четко выделить одновременно и контур рамки, и реперные знаки. Пример распознавания приведен на рисунке 6. На изображении видно, что помимо интересующего контура и реперных знаков под выделение попадают области, обусловленные дефектами на поверхности самого фоторезиста, неравномерностью его полимеризации и цифровыми шумами. Поэтому предлагается рассматривать выделение прямоугольного контура исследуемой области и реперных знаков как две отдельные задачи.

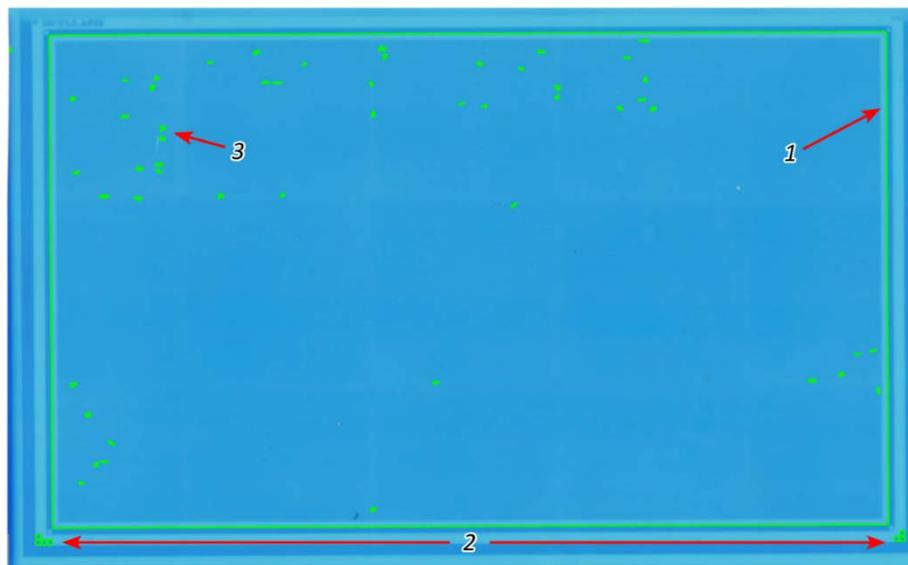


Рисунок 6 — распознавание контуров на изображении: 1 – контур рамки, 2 – реперные знаки, 3 – ошибочно распознанные контура.

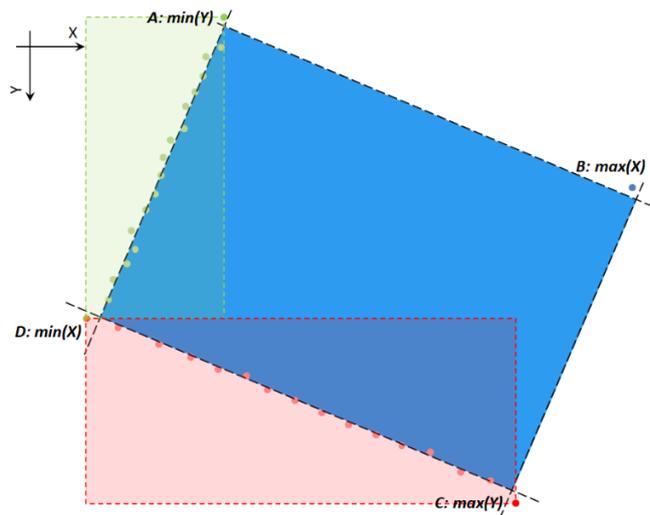
Сначала определим исследуемую область как контур, заданный множеством точек. Для формирования множества возможных контуров производится бинаризация изображения при подобранном пороговом значении яркости. Затем из множества контуров по размеру производится поиск нужного, так как приблизительный размер рамки и, следовательно, контура, не меняется от изображения к изображению.

Поскольку при сканировании положение образца на рабочем поле сканера произвольно, необходимо осуществить поворот изображения. Поворот изображения осуществляется следующими операциями:

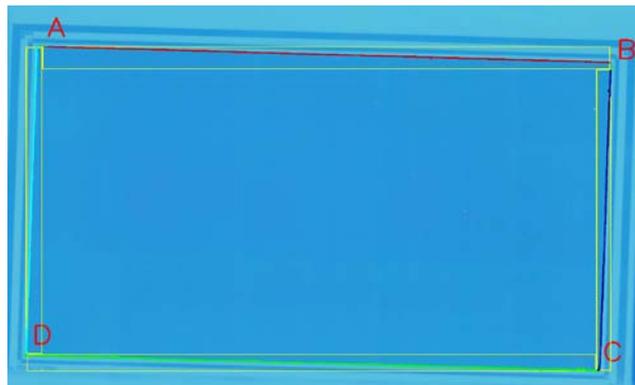
1. Определение из множества точек контура приблизительных координат углов прямоугольника (рисунок 7, а). В качестве критерия углов выбраны точки с минимальным или максимальным значением по координатам X и Y : $A \subset \min(Y)$, $B \subset \max(X)$, $C \subset \max(Y)$, $D \subset \min(X)$. Если точек, удовлетворяющих этому условию больше одной, то значение другой координаты находится как среднее арифметическое значений множества этих точек.
2. Разбиение множества точек контура на подмножества, описывающие отдельные его прямые. Для определения принадлежности точки к тому или иному подмножеству построим на изображении четыре прямоугольника, у которого в качестве точек, расположенных по диагонали, будут выступать соседние точки углов прямоугольника (рисунок 7, а, б). Поскольку найденные координаты точек углов обладают погрешностью, то размер

прямоугольников уменьшен на несколько пикселей по ширине и высоте, чтобы в них не попали точки, принадлежащие другим сторонам.

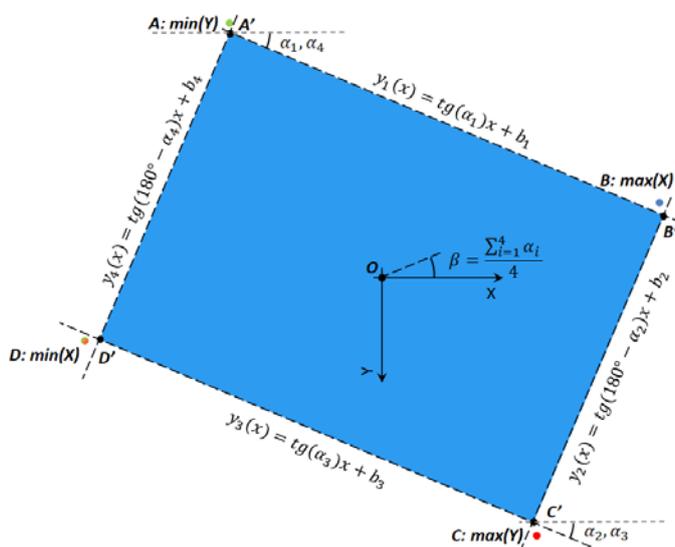
3. Определение с помощью метода наименьших квадратов (МНК) уравнения прямых, описывающих стороны прямоугольника $y_i(x) = k_i x + b_i$. По полученным уравнениям определяется угол наклона α_i каждой прямой (если $k_i > 0$, то $\alpha_i = -\arctg(k_i)$), среднее арифметическое которых определяет угол поворота изображения β (рисунок 7, в).
4. Уточнение координат углов как точек пересечения соседних прямых: A' , B' , C' , D' , Среднее арифметическое значение координат углов является центром прямоугольника O , относительно которого будет производиться поворот изображения.
5. Доворот изображения по реперным точкам (рисунок 7, г). Это необходимо, поскольку произвольное расположение образца во время сканирования при выполнении предыдущих шагов может привести к неверной ориентации заготовки и ее повороту на угол, кратный 90° . Для этого около угла прямоугольника выделяется прямоугольная область, производится ее бинаризация и определяется количество реперных точек на ней (число точек варьируется в углах варьируется от 1 до 4).



а)



б)



в)



г)

Рисунок 7 — шаги поворота изображения: а) определение координат углов и разбиение контура на подмножество точек, принадлежащих разным сторонам прямоугольника; б) выделенные на изображении точки, принадлежащие разным прямым; в) определение уравнений прямых, уточнение координат углов и поиск центра; г) поиск реперных знаков

После поворота осуществляется обрезка изображения симметрично относительно центра прямоугольника O под заданные размеры ширины и высоты (в экспериментах определен размер 2985×1750 пикселей) и последующее сохранение.

Таким образом, алгоритм обработки изображений можно представить в виде следующих шагов, представленных на рисунке Рисунок 8.

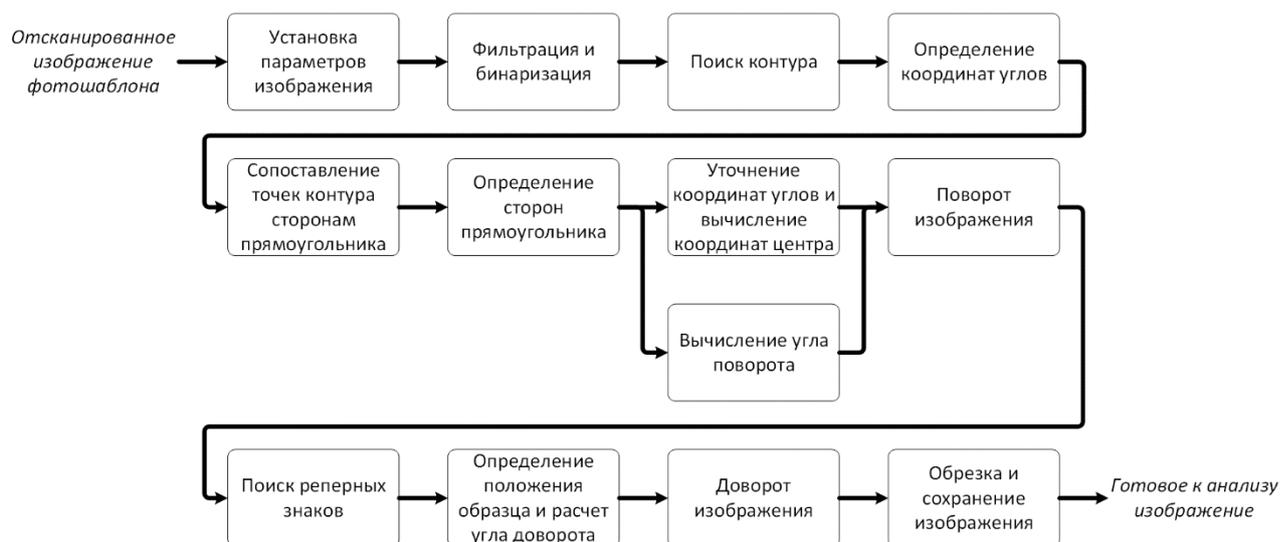


Рисунок 8 — алгоритм обработки изображений

После обработки все полученные изображения с одинаковой прозрачностью маски усредняются и к анализу предъявляются пять изображений, характеризующих цвет фоторезиста в зависимости от прозрачности используемой маски.

Формирование компенсирующей маски

Получив готовую к анализу выборку изображений, можно приступить к определению зависимости прозрачности маски от цвета фоторезиста. Для упрощения выберем один цветовой канал, по которому будем определять интересующую зависимость. Для этого рассмотрим изменение средней яркости красного, зеленого и синего цветовых каналов, а также изменение яркости полутоновых изображений, полученных из исходных (рисунок 9).

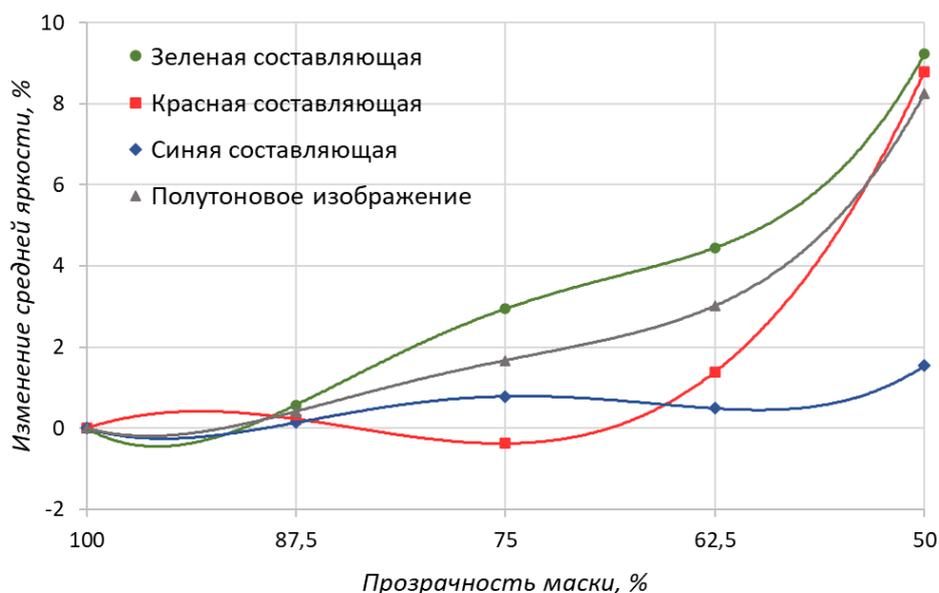


Рисунок 9 — графики изменения средней яркости красной, синей, зеленой составляющих, а также значения яркости полутонного изображения в зависимости от прозрачности маски

Дальнейший анализ основан на рассмотрении зеленой составляющей изображения, так как ее изменение более равномерно относительно красной составляющей и изменение прозрачности маски характеризует большее изменение яркости относительно других цветовых каналов и результатов, полученных по полутонным изображениям.

Анализ изображений производится по их гистограммам (рисунок 10), по которым определяется минимальное, максимальное и среднее значения яркости. Поскольку глубина цвета для исходных изображений составляет 8 бит, то значение яркости варьируется от 0 до 255. Для минимизации влияния шумов при анализе не учитываются значения 0,15% (около 8 тыс.) пикселей, которые имеют минимальные и максимальные значения.

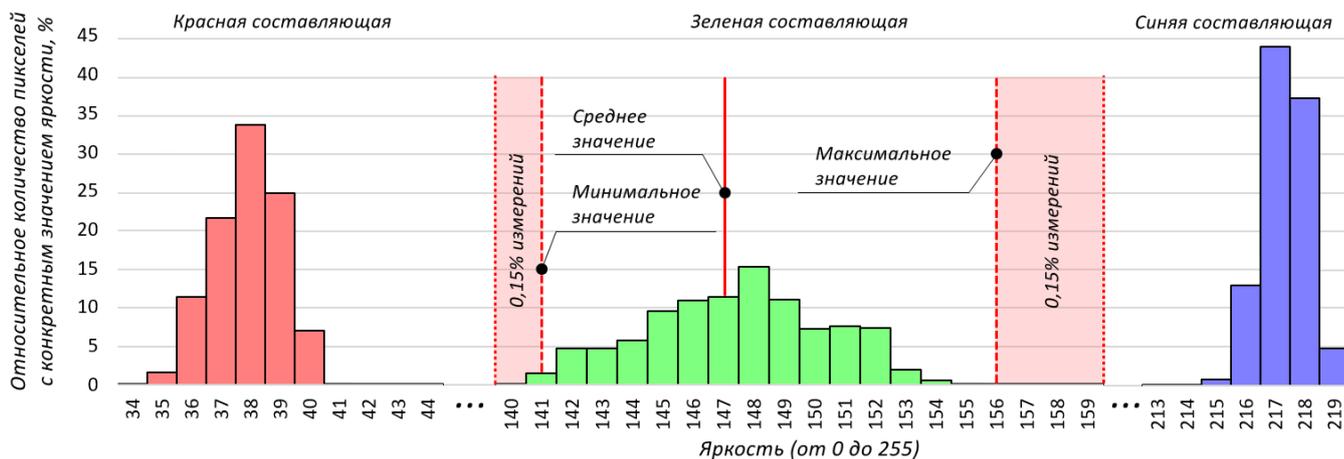


Рисунок 10 — гистограммы яркости красной, зеленой и синей составляющих для изображения фоторезиста с полностью прозрачной маской

По гистограммам зеленой составляющей фоторезиста построим зависимости изменения минимального, среднего и максимального значения яркости в зависимости от прозрачности маски (рисунок 11, а). Затем с помощью МНК интерполируем полученные значения полиномом второй степени и найдем функцию необходимой прозрачности маски для выравнивания цвета фоторезиста. Для этого необходимо выполнить следующие действия.

1. Найти минимальное значение яркости для образца с полностью прозрачной маской (рисунок 11, а, точка 1). Так как использованием маски возможно только лишь сделать фоторезист светлее (увеличить яркость), но не темнее, то выравниванием цвета необходимо замаскировать все участки с яркостью больше минимальной до той степени, чтобы на всем изображении яркость стала одинаковой (минимальной).
2. Определить значение прозрачности маски, при котором среднее и минимальное значения яркости будут равны найденному на предыдущем шаге (рисунок 11, а, точки 2 и 3). Т.е. чтобы выровнять яркость для

пикселей, у которых значение яркости без маски равно 141, 147 и 156 (минимальное, среднее и максимальное значения яркости), необходимо наложить маску со значениями 61%, 70% и 100% соответственно (рисунок 11, б, точки 3, 2, 1);

- По полученным точкам интерполировать функцию необходимой прозрачности маски от яркости зеленой составляющей пикселя полиномом второй степени с помощью МНК.

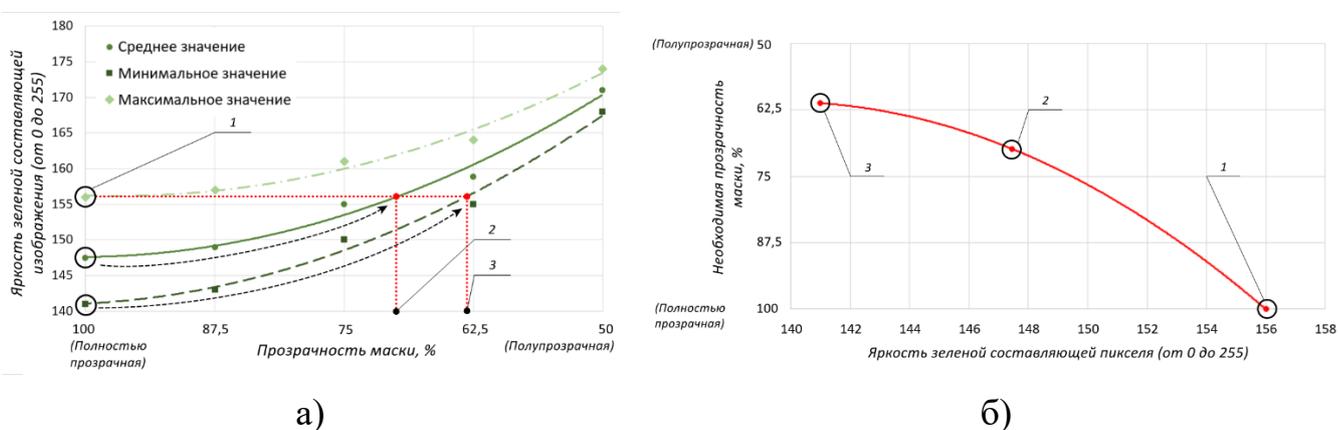


Рисунок 11 — формирование функции компенсирующей маски: а) функции изменения минимального, среднего и максимального значения яркости зеленой составляющей в зависимости от прозрачности маски; б) функция необходимой прозрачности маски в зависимости от яркости зеленой составляющей пикселя

Таким образом, получена следующая функция компенсирующей маски:

$$m = 0,15p^2 - 41,13p + 2933,7, \quad 0 \leq m \leq 100,$$

где m — необходимая прозрачность маски, p — значение зеленой составляющей цвета пикселя.

Применив функцию к каждому пикселю изображения, полученного при полностью прозрачном шаблоне, определим вид компенсирующей маски (рисунок 12).

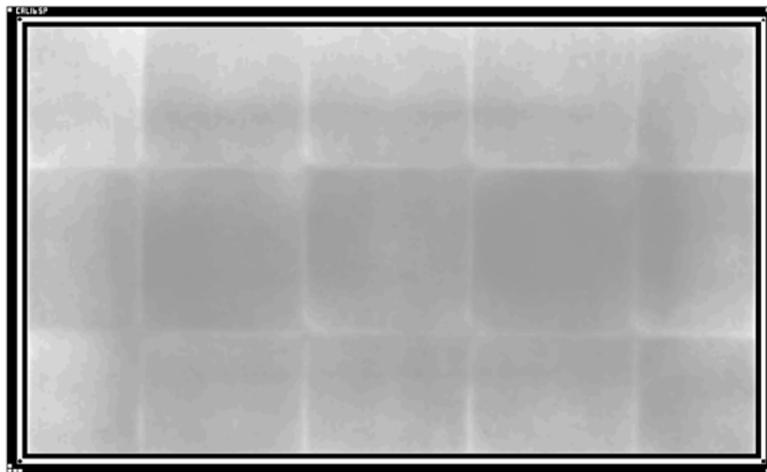
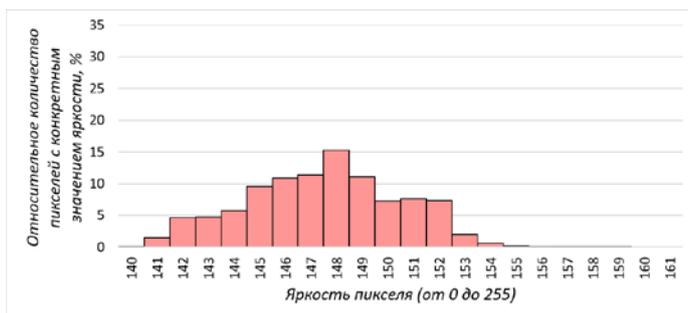
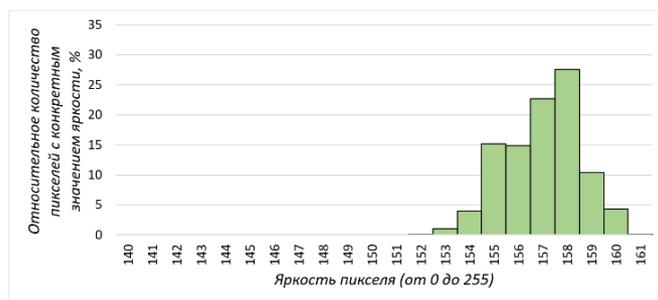


Рисунок 12 — компенсирующая маска

Для проверки уменьшения неравномерности излучения с использованием, компенсирующей маски произведем повторное экспонирование с применением шаблона и без него, а затем оценим изменение гистограммы зеленой составляющей изображений. Полученные гистограммы приведены на рисунке 13.



а)



б)

Рисунок 13 — гистограммы распределения зеленой составляющей изображений фоторезиста: а) без маски; б) с маской

Среднее значение зеленой составляющей изображений и среднеквадратическое отклонение приведены в таблице 1.

Таблица 1 — Статистические характеристики зеленой составляющей изображений

	Среднее арифметическое	Среднеквадратическое отклонение
Без маски	147,46	2,97
С маской	157,00	1,54

Помимо этого, при визуальном рассмотрении изображений фоторезиста отчетливо заметно, что на изображении, полученном с использованием маски, отсутствует сетка от рассеивателя (рисунок 14, у изображений увеличена яркость).

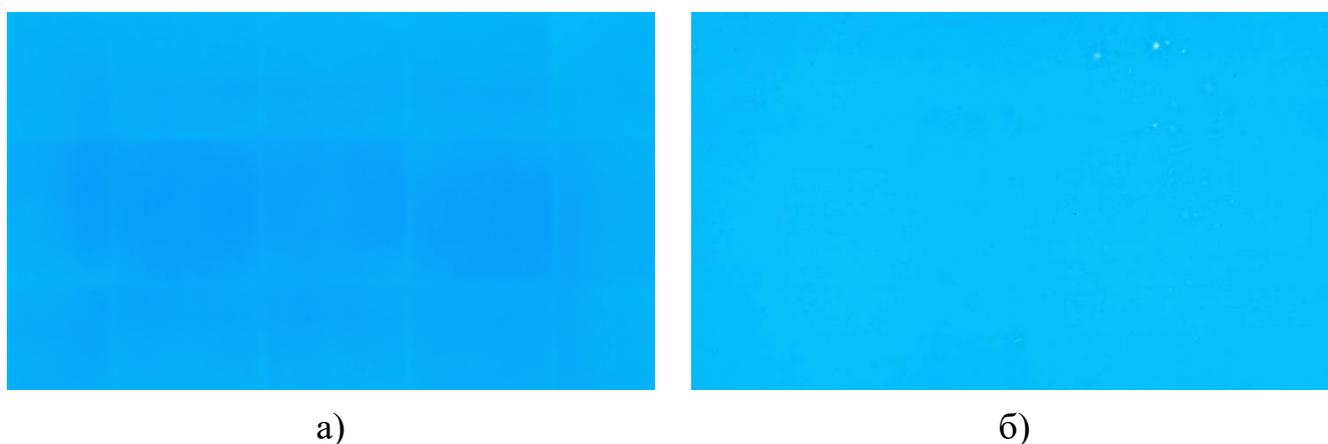


Рисунок 14 — изображения фоторезиста (на изображениях увеличена контрастность): а) без маски; б) с маской

Таким образом, с применением шаблона удалось добиться максимального уменьшения среднеквадратического отклонения яркости зеленой составляющей на 51% по отношению к среднеквадратическому отклонению изображения, полученного без маски.

Заключение

В работе рассмотрена проблема неравномерности УФ излучения на установке прямого экспонирования с применением ЖК матрицы. Исследованы методы компенсации неравномерности и определен лучший, использующий программно

формируемую компенсирующую маску. Предложен метод формирования компенсирующей маски на основе оценки изменения цвета фоторезиста при изменении прозрачности маски.

Разработан алгоритм и программное обеспечение для подготовки изображений, пригодных к анализу неравномерности излучения. Проведена экспериментальная проверка предложенного метода, подтвердившая его работоспособность.

Анализ гистограмм яркости зеленой составляющей изображений, полученных с применением маскирующего шаблона и без, показал уменьшение среднеквадратического отклонения на 51%. Таким образом, рассмотренный метод позволил заметно уменьшить проблему неравномерности распределения УФ излучения у прототипа установки прямого экспонирования, что позволило повысить надежность технологической операции экспонирования с использованием разработанной установки.

Список источников

1. Vantsov S.V., Vasilyev F.V., Medvedev A.M., Khomutskaya O.V. Epoxy-Glass Composite Materials for Substrate Printed Circuit Boards Gigabit Electronics // Amazonia Investiga, 2019, no. 8 (22), pp. 434–442.
2. 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](https://doi.org/10.22184/1992-4178.2020.196.5.128.134)

3. Ванцов С., Медведев А., Маунг Маунг З., Хомутская О. Надежность процесса сверления печатных плат, понятие отказа // Электроника: наука, технология, бизнес. 2016. № 8 (158). С. 168–188.
4. 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.
5. Васильев Ф.В. Физическая надежность электроники. – М.: МАИ, 2022. - 160 с.
6. Платы печатные: справочник / под редакцией К.Ф. Кумбза. В 2-х кн. - М.: Техносфера, 2011. Кн. 1. - 1016 с.
7. Ванцов С.В., Васильев Ф.В., Хомутская О.В., Коробков М.А. Задачи управления технологическими процессами // Научное приборостроение. 2022. № 32 (4). С. 124–137.
8. Назаров А.В., Мельников В.П. Автоматизация проектирования управления обеспечением качества ракетно-космической техники на этапах жизненного цикла // Труды МАИ. 2011. № 49. URL: https://trudymai.ru/published.php?ID=28237&PAGEN_2=2
9. Букирёв А.С., Савченко А.Ю., Яцечко М.И. Применение интеллектуальной диагностической системы информационно-преобразующих авиационных систем интегрированной авионики при внешних возмущающих воздействиях // Труды МАИ. 2023. № 128. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=171408>. DOI: [10.34759/trd-2023-128-20](https://doi.org/10.34759/trd-2023-128-20)

10. 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.
11. Сокольский А.М., Сокольский М.Л. Анализ факторов, влияющих на интенсивность электрохимической миграции // Труды МАИ. 2016. № 90. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=74791>
12. 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](https://doi.org/10.22184/1992-4178.2017.163.3.166.176)
13. Лийн Е.А., Коробков М.А., Хомутская О.В., Ванцов С.В. Формализация работы производственного участка для разработки имитационной модели выполнения сменно-суточного задания // Научно-технический вестник Поволжья. 2023. № 5. С. 212–215.
14. 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](https://doi.org/10.22184/1992-4178.2018.173.2.186.191)
15. Чистяков М.Г., Назаров А.В., Морозов С.А. Методология проектирования радиационно-стойких элементов для САПР электронно-компонентной базы типа «Система-на-кристалле» // Труды МАИ. 2016. № 90. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=74853>

16. Дорожко И.В., Мусиенко А.С., Сундиев Д.С. Имитационная модель, связывающая показатели надежности с показателями тестового и функционального контроля технических систем // Труды МАИ. 2023. № 130. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=174618>. DOI: [10.34759/trd-2023-130-19](https://doi.org/10.34759/trd-2023-130-19)
17. Коробков М.А., Зайкин В.Д., Марейчев Е.С., Хомутская О.В., Васильев Ф.В. Система прямого экспонирования на основе жидкокристаллической матрицы // Научное приборостроение. 2023. № 33 (1). С. 65–85.
18. Горелов А. Исследование чернил 3D-печати электроники: выбор технологий // Электроника: наука, технология, бизнес. 2022. № 7 (218). С. 146–151. DOI: [10.22184/1992-4178.2022.218.7.146.151](https://doi.org/10.22184/1992-4178.2022.218.7.146.151)
19. Gorelov A. Application of 3D printing technologies in production of printed modules // 2021 International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems, 2021, pp. 541–544. DOI: [10.1109/ICOECS52783.2021.9657459](https://doi.org/10.1109/ICOECS52783.2021.9657459)
20. Orzeł B., Stecuła K. Comparison of 3D Printout Quality from FDM and MSLA Technology in Unit Production // Symmetry, 2022, vol. 14, no. 910, pp. 17. DOI: [10.3390/sym14050910](https://doi.org/10.3390/sym14050910)
21. PengJi display. URL: <https://www.szpjgd.com/product/126.html>
22. LS125 Multi-probe UV Light Meter Host. URL: https://www.linshangtech.com/product/LS125_EN.html
23. Казбеков А.В., Максимов Н.А. Методы сравнения контуров в задачах распознавания образов // Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. 2012. № 185. С. 37–42.

24. Максимов Н.А., Шаронов А.В. Анализ формы изображений и распознавание объектов на основе скелетно-контурного представления // Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. 2014. № 207. С. 67–75.
25. Шаронов А.В., Максимов Н.А., Синча Д.П. Устойчивый метод поиска изображений в визуальных базах данных // Труды МАИ. 2011. № 49. URL: https://trudymai.ru/published.php?ID=28119&PAGEN_2=2

References

1. Vantsov S.V., Vasilyev F.V., Medvedev A.M., Khomutskaya O.V. Epoxy-Glass Composite Materials for Substrate Printed Circuit Boards Gigabit Electronics, *Amazonia Investiga*, 2019, no. 8 (22), pp. 434–442.
2. Isaev V. *Elektronika: nauka, tekhnologiya, biznes*, 2020, no. 5 (196), pp. 128–137. DOI: [10.22184/1992-4178.2020.196.5.128.134](https://doi.org/10.22184/1992-4178.2020.196.5.128.134)
3. Vantsov S., Medvedev A., Maung Maung Z., Khomutskaya O. *Elektronika: nauka, tekhnologiya, biznes*, 2016, no. 8 (158), pp. 168–188.
4. Vantsov S.V., Medvedev A.M., Maung-Maung Z., Khomutskaya O.V. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system*, 2016, no. 2 (14), pp. 37–44.
5. Vasil'ev F.V. *Fizicheskaya nadezhnost' elektroniki* (Physical reliability of electronics), Moscow, MAI, 2022, 160 p.
6. Kumbz K.F. *Platy pechatnye: spravochnik* (Printed circuit boards: handbook), edited by in 2 books, Moscow, Tekhnosfera, 2011, book 1. - 1016 p.

7. Vantsov S.V., Vasil'ev F.V., Khomutskaya O.V., Korobkov M.A. *Nauchnoe priborostroenie*, 2022, no. 32 (4), pp. 124–137.
8. Nazarov A.V., Mel'nikov V.P. *Trudy MAI*, 2011, no. 49. URL: https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=28237&PAGEN_2=2
9. Bukirev A.S., Savchenko A.Yu., Yatsechko M.I. *Trudy MAI*, 2023, no. 128. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=171408>. DOI: [10.34759/trd-2023-128-20](https://doi.org/10.34759/trd-2023-128-20)
10. Vasil'ev F.V., Vantsov S.V., Medvedev A.M., Stepanova M.A., Khomutskaya O.V. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system*, 2016, no. 3 (15), pp. 85–91.
11. Sokol'skii A.M., Sokol'skii M.L. *Trudy MAI*, 2016, no. 90. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=74791>
12. Mozharov V.A., Khomutskaya O.V. *Elektronika: nauka, tekhnologiya, biznes*, 2017, no. 3 (163), pp. 166–176. DOI: [10.22184/1992-4178.2017.163.3.166.176](https://doi.org/10.22184/1992-4178.2017.163.3.166.176)
13. Liin E.A., Korobkov M.A., Khomutskaya O.V., Vantsov S.V. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Povolzh'ya*, 2023, no. 5, pp. 212–215.
14. Kulikov N., Khomutskaya O., Vantsov S. *Elektronika: nauka, tekhnologiya, biznes*, 2018, no. 2 (173), pp. 186–191. DOI: [10.22184/1992-4178.2018.173.2.186.191](https://doi.org/10.22184/1992-4178.2018.173.2.186.191)
15. Chistyakov M.G., Nazarov A.V., Morozov S.A. *Trudy MAI*, 2016, no. 90. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=74853>
16. Dorozhko I.V., Musienko A.S., Sundiev D.S. *Trudy MAI*, 2023, no. 130. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=174618>. DOI: [10.34759/trd-2023-130-19](https://doi.org/10.34759/trd-2023-130-19)
17. Korobkov M.A., Zaikin V.D., Mareichev E.S., Khomutskaya O.V., Vasil'ev F.V. *Nauchnoe priborostroenie*, 2023, no. 33 (1), pp. 65–85.

18. Gorelov A. *Elektronika: nauka, tekhnologiya, biznes*, 2022, no. 7 (218), pp. 146–151.
DOI: [10.22184/1992-4178.2022.218.7.146.151](https://doi.org/10.22184/1992-4178.2022.218.7.146.151)
19. Gorelov A. Application of 3D printing technologies in production of printed modules, *2021 International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems*, 2021, pp. 541–544. DOI: [10.1109/ICOECS52783.2021.9657459](https://doi.org/10.1109/ICOECS52783.2021.9657459)
20. Orzeł B., Stecuła K. Comparison of 3D Printout Quality from FDM and MSLA Technology in Unit Production, *Symmetry*, 2022, vol. 14, no. 910, pp. 17.
DOI: [10.3390/sym14050910](https://doi.org/10.3390/sym14050910)
21. *PengJi display*. URL: <https://www.szpjgd.com/product/126.html>
22. *LS125 Multi-probe UV Light Meter Host*. URL: https://www.linshangtech.com/product/LS125_EN.html
23. Kazbekov A.V., Maksimov N.A. *Nauchnyi vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta grazhdanskoi aviatsii*. 2012. № 185. С. 37–42.
24. Maksimov N.A., Sharonov A.V. *Nauchnyi vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta grazhdanskoi aviatsii*, 2014, no. 207, pp. 67–75.
25. Sharonov A.V., Maksimov N.A., Sincha D.P. *Trudy MAI*, 2011, no. 49. URL: https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=28119&PAGEN_2=2

Статья поступила в редакцию 07.07.2023

Одобрена после рецензирования 30.08.2023

Принята к публикации 27.10.2023

The article was submitted on 07.07.2023; approved after reviewing on 30.08.2023; accepted for publication on 27.10.2023