

УДК 621.382

Роман К. Можяев¹, Александр А. Печенкин², Артём Н. Цирков³,
Кирилл Г. Белозеров⁴, Владислав П. Лукашин⁵, Арсений А. Балувев⁶

¹⁻⁶Акционерное общество «Экспериментальное научно-производственное объединение
СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫЕ ЭЛЕКТРОННЫЕ СИСТЕМЫ»,
Каширское ш., 31, Москва, 115409, Россия

¹⁻⁶Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,
Каширское ш., 31, Москва, 115409, Россия

¹e-mail: rkmzh@spels.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4769-7365>

²e-mail: aapech@spels.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8215-6196>

³e-mail: antsir@spels.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4747-898X>

⁴e-mail: kgbel@spels.ru, <https://orcid.org/0009-0008-1886-4647>

⁵e-mail: vpluk@spels.ru, <https://orcid.org/0009-0009-1719-6672>

⁶e-mail: aabal@spels.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4025-8247>

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ МАШИННОГО ЗРЕНИЯ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ
ТОЧНОСТИ СФОКУСИРОВАННОГО ЛАЗЕРНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ
НА МИКРОЭЛЕКТРОННЫЕ СТРУКТУРЫ В ПРОЦЕССАХ ИССЛЕДОВАНИЙ
И МИКРООБРАБОТКИ

DOI: <http://dx.doi.org/10.26583/bit.2023.4.10>

Аннотация. Машинное зрение – это область искусственного интеллекта, занимающаяся обработкой изображений и видеопотока при помощи специальных алгоритмов. Это позволяет устройствам анализировать визуальную информацию. Машинное зрение помогает в таких задачах, как распознавание образов, сегментация изображений, обнаружение объектов и слежение за ними. В микроскопии машинное зрение играет важную роль, в частности в лазерной сканирующей микроскопии (LSM). Лазерная сканирующая микроскопия, лазерное нанесение надрезов и лазерная коррекция топологии полупроводниковых кристаллов являются важными технологическими процессами в производстве, контроле и наладке полупроводниковых кристаллов, как на отладочных образцах, так и в серийных партиях пластин. Лазерное воздействие позволяет не только механически разделять кристаллы, но и осуществлять более деликатные и малоинвазивные воздействия, в частности подстройки сопротивления тонкопленочных резисторов или пережигание перемычек, необходимых для конфигурирования схемы и отключения неиспользуемых блоков кристалла. В работе проведен анализ основных параметров системы позиционирования в составе лазерной сканирующей установки, их влияние на точность сканирования и координат воздействия сфокусированным излучением в контрольных точках. Описаны принципы алгоритмов машинного зрения при работе с изображением сканируемого объекта и результаты апробации в задаче автоматизированного лазерного пережигания перемычек на полупроводниковой пластине. Поскольку число перемычек может достигать сотен тысяч, а системы позиционирования имеют значительные погрешности машинное зрение позволяет корректировать погрешности позиционирования и повысить точность лазерного воздействия на любом участке и этапе сканирования, что значительно повышает качество итогового результата лазерного воздействия.

Ключевые слова: машинное зрение, лазерная сканирующая микроскопия, коррекция топологии, микроэлектроника, лазерное скрайбирование.

Для цитирования: МОЖАЕВ Роман К. и др. ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ МАШИННОГО ЗРЕНИЯ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ СФОКУСИРОВАННОГО ЛАЗЕРНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА МИКРОЭЛЕКТРОННЫЕ СТРУКТУРЫ В ПРОЦЕССАХ ИССЛЕДОВАНИЙ И МИКРООБРАБОТКИ. Безопасность информационных технологий, [S.l.], т. 30, № 4, с. 150–161, 2023. ISSN 2074-7136. URL: <https://bit.spels.ru/index.php/bit/article/view/1556>. DOI: <http://dx.doi.org/10.26583/bit.2023.4.10>.

Roman K. Mozhaev¹, Alexander A. Pechenkin², Artem A. Tsirkov³,
Kirill G. Belozerov⁴, Vladislav P. Lukashin⁵, Arseniy A. Baluev⁶
¹⁻⁶Joint Stock Company “Experimental Research and Production Association
SPECIAL ELECTRONIC SYSTEMS”,

Kashirskoe sh., 31, Moscow, 115409, Russia

¹⁻⁶National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute),
Kashirskoe sh., 31, Moscow, 115409, Russia,

¹e-mail: rkmzh@spels.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4769-7365>

²e-mail: aapech@spels.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8215-6196>

³e-mail: antsir@spels.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4747-898X>

⁴e-mail: kgbel@spels.ru, <https://orcid.org/0009-0008-1886-4647>

⁵e-mail: vpluk@spels.ru, <https://orcid.org/0009-0009-1719-6672>

⁶e-mail: aabal@spels.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4025-8247>

Application of machine vision technology for focused laser effect accuracy improvement in microelectronic structures research and semiconductor microprocessing

DOI: <http://dx.doi.org/10.26583/bit.2023.4.10>

Abstract. Machine vision is a field of artificial intelligence that deals with processing images and videos using special algorithms. This allows devices to analyze visual information. Machine vision helps with tasks such as pattern recognition, image segmentation, object detection, and tracking. In microscopy, machine vision plays an important role, particularly in laser scanning microscopy (LSM). Laser scanning microscopy, laser scribing, and laser correction of the topology of semiconductor crystals are important technological processes in the production, control and adjustment of semiconductor crystals both on debug samples and as part of a test batch on a wafer. Laser exposure allows not only mechanically separate crystals, but also carry out more delicate and minimally invasive actions, in particular, adjustments to the values of thin-film resistors or burning of bridges necessary to adjust the circuit and disable unused blocks of the crystal. The paper lists the main parameters of the positioning system as part of the laser scanning setup, their impact on the quality of scanning and exposure to focused radiation at control points. The principles of machine vision algorithms when working with the image of the scanned object and the results of testing in the task of automated laser burning of bridges on a semiconductor wafer are described. Since the number of bridges can reach tens of thousands, and positioning systems have significant errors, machine vision allows you to correct the area and accuracy of laser exposure at any stage of scanning, which significantly improves the quality and efficiency of the process.

Keywords: machine vision, laser scanning microscopy, topology correction, microelectronics, laser scribing, automation.

For citation: MOZHAEV Roman K. et al. Application of machine vision technology for focused laser effect accuracy improvement in microelectronic structures research and semiconductor microprocessing. IT Security (Russia), [S.l.], v. 30, no. 4, p. 150–161, 2023. ISSN 2074-7136. URL: <https://bit.spels.ru/index.php/bit/article/view/1556>. DOI: <http://dx.doi.org/10.26583/bit.2023.4.10>.

Введение

Развитие и совершенствование технологий неразрывно связано с повышением объемов и усложнением регистрируемой и обрабатываемой информации. В задачах, где необходима визуальная оценка наблюдаемых объектов с последующим оперативным принятием решений может применяться машинное зрение.

Машинное зрение позволяет автоматизировать многие процессы, которые ранее выполнялись вручную, улучшает качество и скорость работы и может использоваться для определения объектов, распознавания образов, отслеживания движения, анализа изображений и во многих других задачах. В основе машинного зрения лежит процесс обработки и анализа изображений с использованием компьютерного зрения и искусственного интеллекта для извлечения полезной информации.

Возможности машинного зрения также являются подспорьем в задачах микроскопии, в том числе с использованием сканирующего лазерного излучения, где необходимо осуществлять прецизионное воздействие в поле нескольких микрон, при этом иметь возможность перемещаться на миллиметры с сохранением микронной точности позиционирования.

Машинное зрение и лазерная сканирующая микроскопия (ЛСМ) [1–3] находят применение в определении и контроле доверенности изделий электронной компонентной базы (ЭКБ). Доверенность ЭКБ подразумевает соответствие изделия требованиям к функционально-техническим, эксплуатационным характеристикам и предъявляемым требованиям по технологической, функциональной и информационной безопасности. В задачах обеспечения и контроля доверенности применяются сфокусированные лазеры для диагностики и анализа отказов, получения «карты фотооткликов» кристаллов, для идентификации подлинности интегральных схем, а также для обнаружения недеklarированных топологических коррекций и включений (например, методами OVIC, LIVA и др. [1, 4–6]). ЛСМ также применяется при испытаниях на стойкость изделий ЭКБ к одиночным радиационным эффектам при имитации попадания иона с помощью сфокусированного импульса на поверхности полупроводникового кристалла [7, 8].

Применение машинного зрения и лазерных технологий в задачах доверенности ЭКБ предоставляет возможность проводить точные и детальные исследования, а также контролировать качество изделий и процессов их производства. Они способны обнаруживать дефекты, аномалии и недостатки, что повышает надежность и доверенность электронных компонентов. Применение машинного зрения и сфокусированных лазеров имеет широкий научно-технический потенциал и может быть полезным инструментом в области обеспечения и контроля доверенности изделий ЭКБ.

Расширение горизонтов применения лазерной сканирующей микроскопии от единичных изделий до кристаллов на полупроводниковой пластине, например, в задачах лазерной подстройки и коррекции топологии, приводит к необходимости повторения определенных процедур на тысячах однотипных элементов. Помимо алгоритмизации паттерна движения и скрайбирования (нанесения надрезов заданной глубины на поверхности), машинное зрение позволяет компенсировать технические ограничения систем позиционирования установок, что подробно рассмотрено далее.

1. Технические ограничения систем прецизионного перемещения

В задачах скрайбирования и микрообработки высокоточным лазерным воздействием сканирование осуществляется путем перемещения объекта относительно неподвижного лазерного Гауссова пучка с прецизионными (менее 10 мкм) точностями. Перемещение осуществляется, как правило, моторизованными платформами, которые характеризуются следующими параметрами точности:

1) *Минимальный шаг перемещения* – минимальное расстояние линейного перемещения платформы, в задачах прецизионного позиционирования составляет доли микрон.

2) *Воспроизводимость* – определяется люфтами ходового винта при перемещении в прямом и обратном направлении по оси движения. Этот параметр также известен как «возвратный люфт/зазор» и отражает величину, на которую можно отклониться при перемещении из точки и обратно в точку по одной оси. Типовое значение составляет 2–5 мкм. Соответственно, при перемещении по двум осям одновременно возможное «пятно несовпадения» достигает размеров 5×5 мкм.

3) *Точность однонаправленного позиционирования* – определяет, насколько стабилен шаг ходового винта на всем диапазоне перемещения. Например, перемещение на

100 мкм на любом участке длины винта одинаково. Типовая точность составляет 30 мкм. Это означает, что перемещение на 1 мм по факту составляет $1 \text{ мм} \pm 30 \text{ мкм}$. Когда лазерное воздействие осуществляется в пределах одного кристалла размером $10 \times 10 \text{ мм}$ стабильность и точность не столь существенны, т.к. требуется разовое прицеливание и ориентирование осуществляется в области самого кристалла. Когда ведется работа с пластиной и необходимо перемещаться между кристаллами, при том, что пластина сделана с высокой (литографической) точностью, движение по идеализированному паттерну приводит к тому, что в определенный момент область воздействия смещается на соседнем кристалле в другую область в связи с расхождением попадания в шаг.

4) *Прямолинейность движения* – при значении по спецификации «не более 25 мкм» означает, что прямолинейность в пределах перемещения (отклонение по огибающей вдоль оси) не более 25 мкм).

5) *Параллелизм движения* – при значении по спецификации «не более 25 мкм» означает, что возвратное движение вдоль оси X пойдет через другую координату на оси Y , но параллельно ей с точностью 25 мкм.

6) *Ортогональность X и Y* на всем диапазоне одной из осей подтверждает перпендикулярность перемещения по этим осям. Так в плоскости объекта XU в разных участках перемещения «10 мкм» может составлять от 9 до 12 мкм. При перемещении вдоль оси X возможно смещение вдоль X на 10 мкм и меньше и при возвратно-поступательном движении возможно несоответствие с исходной линией перемещения Y на несколько мкм. При этом смена направления движения имеет обратный эффект. Типовая величина смещения составляет до 5 мкм.

В задачах лазерной сканирующей микроскопии помимо перемещения исследуемого объекта, для осуществления прецизионного лазерного воздействия необходимо получить остросфокусированное лазерное излучение. Для этого используется подстройка фокусировки смещением вдоль оси Z . Ось Z технически не отличается от осей X и Y (по параметрам), при этом возвратный люфт естественно снижается гравитацией, а конечная величина параллелизма движения приводит к тому, что при смене направления движения по оси Z происходит смещение по X или Y (в общем случае – по обеим осям). Природа этих проблем кроется в конечном значении зазора в направляющих каретках систем позиционирования. Природа возвратного люфта – люфт винт-гайка, люфт винт-корпус и в точности подшипников.

Описанные особенности не являются конечными: при закреплении оснастки с объектом, фокусирующий модуль и другие элементы, суммарно обладающие массой до нескольких килограмм, и приведении системы в движение, возникают механические напряжения в оснастке, натяжение в проводах, что приводит к дополнительным отклонениям.

В результате вышеописанных несовершенств систем перемещения при перемещении от интересующей области № 1 до интересующей области № 2 имеет место отклонение от нее на величину порядка 10–20 мкм, что даже с учетом выверенного следования по выбранному пути сканирования приводит к тому, что в определенный момент воздействие осуществится вне интересующей области, что чревато тем, что перемычка останется нетронутой, но при этом будет поврежден важный участок металлизации. Существуют различные пути минимизации этих погрешностей. Один из них – установка оптических шифраторов на систему перемещения, но они не решают проблему параллельности движения и смещения. При этом анализ микроскопического изображения вполне четко и ясно показывает куда и на сколько сместился объект при движении. Именно в этом и проявляются преимущества применения машинного зрения.

1. Применение машинного зрения в лазерной сканирующей микроскопии

Алгоритмы машинного зрения позволяют определить величину смещения изображения по сравнению с эталонным изображением в плоскости, например, используя функцию фазовой корреляции. Фазовая корреляция – один из широко используемых методов регистрации изображений при обработке медицинских изображений и дистанционном зондировании. Одним из основных ограничений метода регистрации на основе фазовой корреляции является то, что он может справиться только с евклидовыми преобразованиями, такими как перемещение, вращение и масштабирование, что ограничивает его применение в более широких областях, таких как сопоставление многоракурсных изображений.

В двумерном случае для двух изображений $f(x, y)$ и $g(x, y)$ если $g(x, y) = f(x - a, y - b)$, т.е. одна функция сдвинута относительно другой, применяя обратное преобразование Фурье, получаем функцию фазовой корреляции, которая является дельта-функцией с пиком в точке с координатами (a, b) . Если одна функция повернута относительно другой на некоторый угол β , т.е. $g(x, y) = f(x \cos \beta + y \sin \beta; -x \sin \beta + y \cos \beta)$, то амплитуды преобразований Фурье-функций $f(x, y)$ и $g(x, y)$ совпадают с точностью до угла поворота β [9].

В рассматриваемых задачах метод фазовой корреляции позволяет определить на сколько пикселей с субпиксельной точностью осуществлено смещение на по осям X, Y относительно искомого изображения, при этом изображения должны быть получены с хорошей точностью при одинаковом освещении, а гистограмма яркости должна максимально-полно заполнять шкалу.

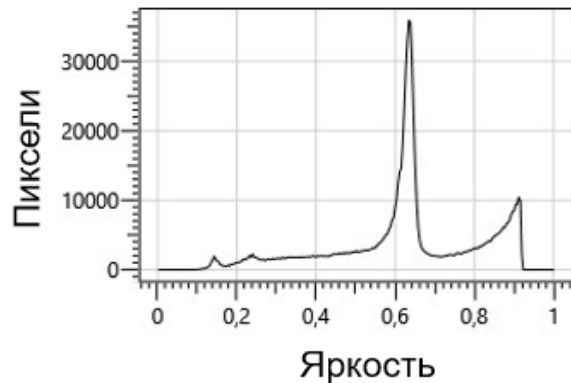
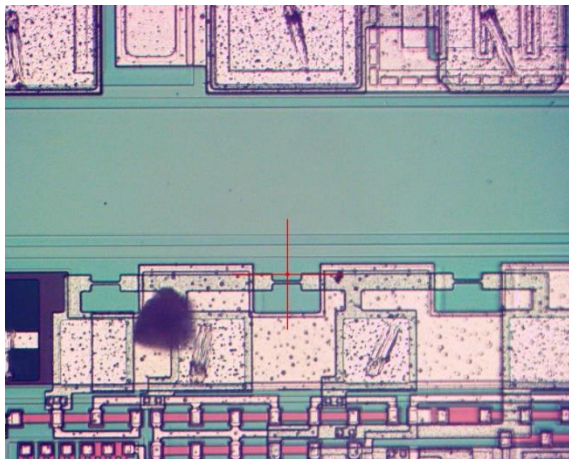
На выходе корреляционной функции имеем 3 величины:

1. величина смещения по X ,
2. величина смещения по оси Y ,
3. значение функции корреляции.

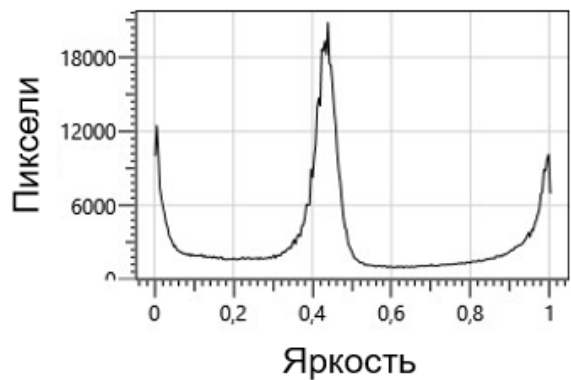
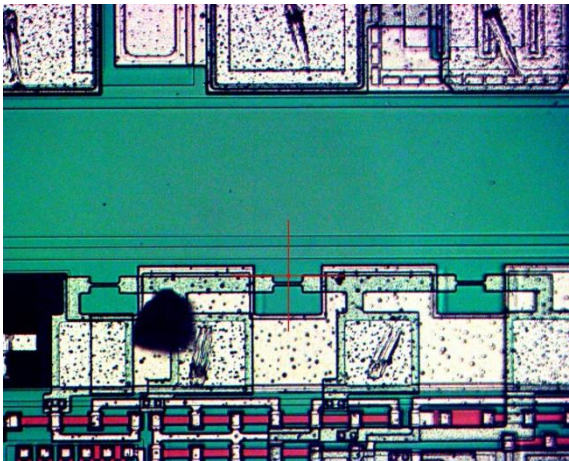
По значению функции корреляции можно оценить, насколько хорошо машинное зрение определило величину смещения. Задав некоторое пороговое значение, можно исключить возможные ошибки неустойчивого детектирования.

Существуют сопутствующие проблемы: при смещении в плоскости XU может иметь место уход из плоскости острой фокусировки по оси Z . Учитывая, что типовая глубина резкости микрообъектива с кратностью $\times 20$ составляет около 1,5 мкм, что сравнимо с высотой рельефа микронной полупроводниковой структуры, это приводит к ошибкам машинного зрения и, в частности, функции корреляции. При таком незначительном отклонении возможно получение резкого изображения слоев пассивации, поликремния или металла в пределах одной области интереса. Типовой шаг слоев металлизации составляет около 1 мкм, при этом неизменность размера фокусировки пучка лазерного излучения сохраняется на глубине 2 мкм и более, Критерий резкого изображения варьируется в этом диапазоне, при этом для максимального заполнения функции контрастности (гистограммы яркости) необходимо увеличивать контрастность изображения (рис. 1 а, б), что влечет появление «фантомов» на изображении.

Также при смещении плоскости фокусировки появляются контрастные границы на переходах пассивации, полупрозрачных областях. Это приводит к тому, что при сравнительно небольшой расфокусировке функция автокорреляции неустойчиво находит изображение, либо не находит вообще. Чтобы устранить данный недостаток машинному зрению необходимо определить резкое ли изображение.



(а) кадр с малой контрастностью и его гистограмма яркости
(a) a low-contrast frame and its brightness histogram



(б) кадр с высокой контрастностью и его гистограмма яркости
(b) a high contrast frame and its brightness histogram

Рис. 1. Слабоконтрастный (а) и контрастный (б) кадр (поле зрения камеры при сканировании полупроводниковой пластины) и их гистограммы яркости

Fig. 1. Low-contrast (a) and contrast (b) frames (the field of view of the camera when scanning a semiconductor wafer) and their brightness histograms

Критериями резкости для системы машинного зрения могут быть следующие функции:

- а) максимальная яркость – неудовлетворительный критерий;
- б) максимальная контрастность изображения – не идеален, но лучше предыдущего;
- в) метод с использованием оператора Лапласа (его дискретный аналог) [10].

Как отмечено ранее – изображение можно представить в виде двумерной функции, где значения в каждой точке (координатами x и y) представляют интенсивность или уровень серого. Если эти значения ограничены дискретным числом, изображение называется цифровым. В цифровом изображении каждый элемент (пиксель), имеет определенное значение и располагается в определенном месте [11].

В краевой области интенсивности пикселей наблюдается сильное изменение интенсивности. Получив первую производную интенсивности, заметно, что край характеризуется максимумом, при этом вторая производная равна нулю. Таким образом, можно использовать этот критерий, чтобы обнаружить края изображения. Поскольку изображения являются двумерными, нужно взять производную в обоих измерениях, для этого используется оператор Лапласа:

$$Laplace(f) = \frac{d^2x}{dx^2} + \frac{d^2y}{dy^2}.$$

Оператор Лапласа помогает найти некую величину, соответствующую резкости изображения. Он возвращает некое значение, максимум которого соответствует наибольшей резкости изображения. Существуют особенности: оператор Лапласа хорошо детектирует резко меняющиеся переходы яркости между соседними пикселями, на что накладываются амплитудные шумы камеры, регистрирующей изображение. Получается, что вариации шумов от кадра к кадру при неизменном положении фокуса становятся сравнимыми с вариацией функции Лапласа при незначительной расфокусировке. С шумами камеры в системах машинного зрения можно и нужно бороться. Наиболее часто для этих целей используются два подхода.

1. усреднение шумов по нескольким кадрам без изменения смещения по оси Z.
2. применение «Гауссового размытия» по нескольким пикселям, соответствующим разрешающей способности объектива.

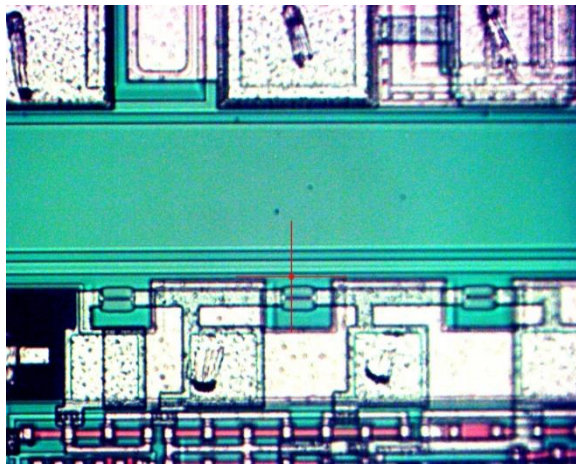
«Размытие» при помощи Гауссовой функции используется в цифровой обработке изображений для смягчения изображений. Поскольку преобразование Фурье Гауссовой функции также является Гауссовой функцией, применение размытия при помощи Гауссовой функции приводит к сокращению высокочастотных элементов изображения. Это делает размытие при помощи гауссовской функции низкочастотным фильтром [12–15].

С технической стороны, разрешение камеры составляет 1920×1080 пикселей с увеличением 0,3 мкм на пиксель, что составляет 3 пикселя на микрон, при этом разрешающая способность объектива составляет порядка 0,7–1 мкм (количество пикселей в матрице в приведенном случае избыточно по сравнению с разрешающей способностью оптики), значит можно провести усреднение по 3 пикселям, сделать Гауссово размытие, добавить функцию Лапласа и получить стабильную функцию, отражающую степень резкости.

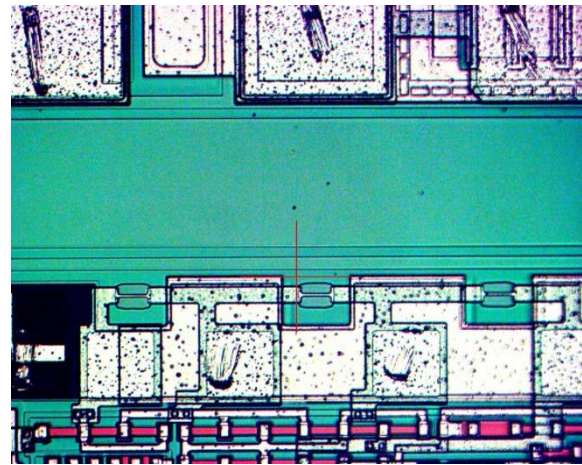
Таким образом имеется инструментарий с помощью которого можно определить степень резкости, и реализовать автоматизированную процедуру:

1. перемещение в интересующую область по координатам X;Y, в конкретном случае – область перерезания металлической перемычки (рис. 2 а);
2. анализ функции фазовой корреляции и определение величины отклонения от целевой точки. В случае, если значение функции фазовой корреляции становится ниже порогового (настраиваемого), то это означает, что машинное зрение не нашло нужную область;
3. анализ функции Лапласа, предварительно проведя сглаживание изображения и усреднение по нескольким кадрам;
4. осуществление небольшого смещение вдоль оси фокусировки, нахождение максимума функции Лапласа и повторение поиска функции фазовой корреляции по величине смещения (рис. 2 б);
5. в случае определения удовлетворительной функции смещения с откликом больше порогового – осуществляется перемещение в эти координаты (на величину смещения) и повторение процедуры корреляции до тех пор, пока величина функции смещения не станет меньше заданной (рис. 2 в)

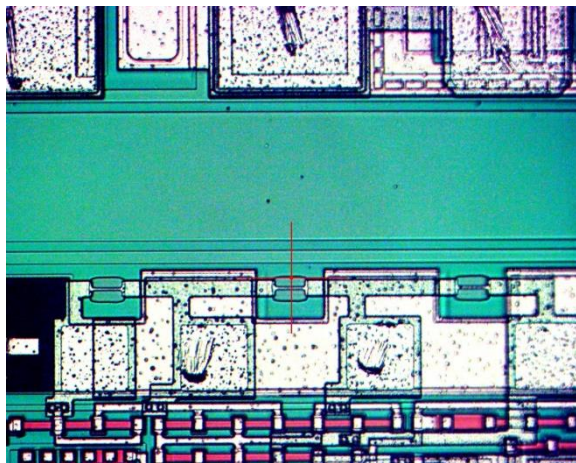
б. проведение лазерного воздействия (рис. 2 г) и перемещение в следующую интересующую область (повторение алгоритма, начиная с п. 1).



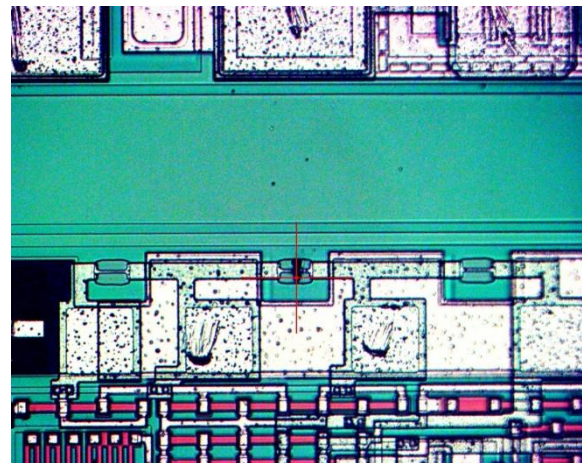
(а) перемещение к области.
Низкая контрастность.
(a) moving to the area. Low contrast.



(б) повышение контрастности.
Смещение на $-1;7$ (X;Y).
(b) contrast enhancement. Offset by $-1;7$ (X;Y).



(в) центрирование.
Смещение на $-13,3;6,27$ (X;Y).
(c) centering. Offset by $-13.3;6.27$ (X;Y).



(г) пережигание дорожки
со смещением на $0,08;0,244$ (X;Y).
(d) burnout of the track with an offset of
 $0.08;0.244$ (X;Y).

Рис. 2. Перемещение к контрольной точке с автокорректировкой
Fig. 2. Moving to the control point with auto-correction

На рис. 3 в упрощенном виде продемонстрировано перемещение (в плоскости XY) между контрольными точками в произвольной области на пластине. На рис. 3 а) представлен идеальный запрограммированный в системе сканирования путь. На рис. 3 б) отличие идеального от реального пути представлено в виде отклонений относительно перпендикулярных направлений движения, что условно отражает несовершенство системы позиционирования. На рис. 3 в) продемонстрирована корректировка перемещения в контрольные точки с теми же несовершенствами системы позиционирования. Стоит отметить, что в данном случае приоритетным критерием является попадание в нужные контрольные точки, а не соответствие пути сканирования между ними «идеальному».

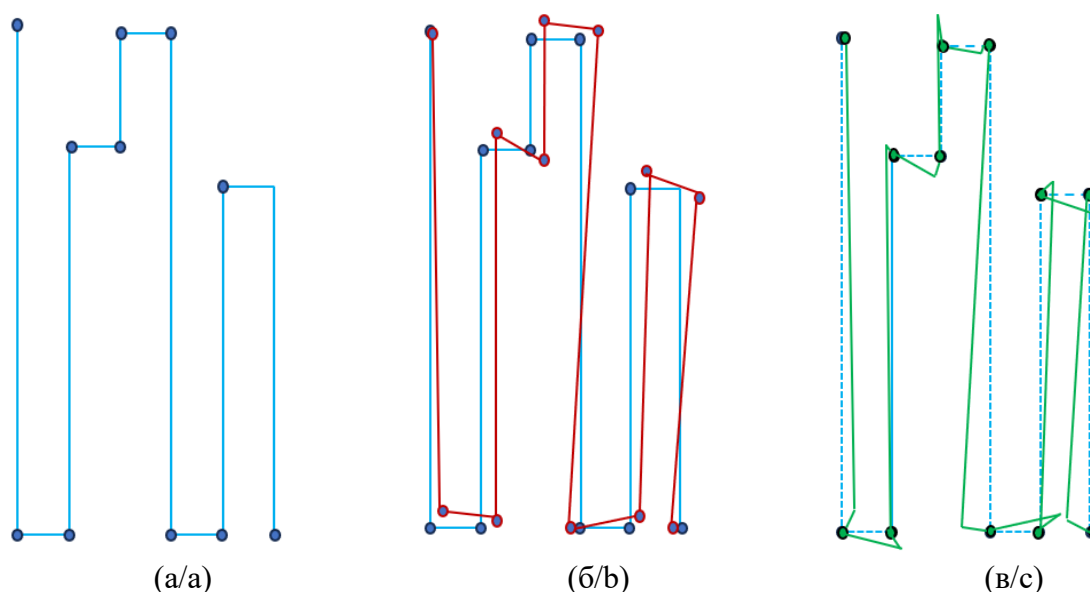


Рис. 3. Прохождение контрольных точек (с лазерным воздействием в них):

Fig. 3. Passage of control points (with laser exposure in them):

- (а) запланированное прохождение контрольных точек. (a) ideal trajectory;
(б) прохождение контрольных точек с учетом особенностей системы позиционирования. (b) real trajectory considering positioning system features;
(в) прохождение контрольных точек с учетом особенностей системы позиционирования и корректировкой с помощью системы машинного зрения. (c) real trajectory considering positioning system features corrected with machine vision.

На кристалле могут появляться лишние включения (пылинки, дефекты), которые:

а) нарушают «плоскостность» картины, размывают функцию Лапласа при фокусировке вдоль оси Z (например, при размере пылинки 5 мкм, в пределах 5 мкм смещения вдоль оси Z Лапласиан везде одинаков);

б) отличие картинки от эталонной области. В область поля зрения попадают высококонтрастные метки совмещения и технологические тестовые структуры (рис. 4) на краях между кристаллами и на границах.

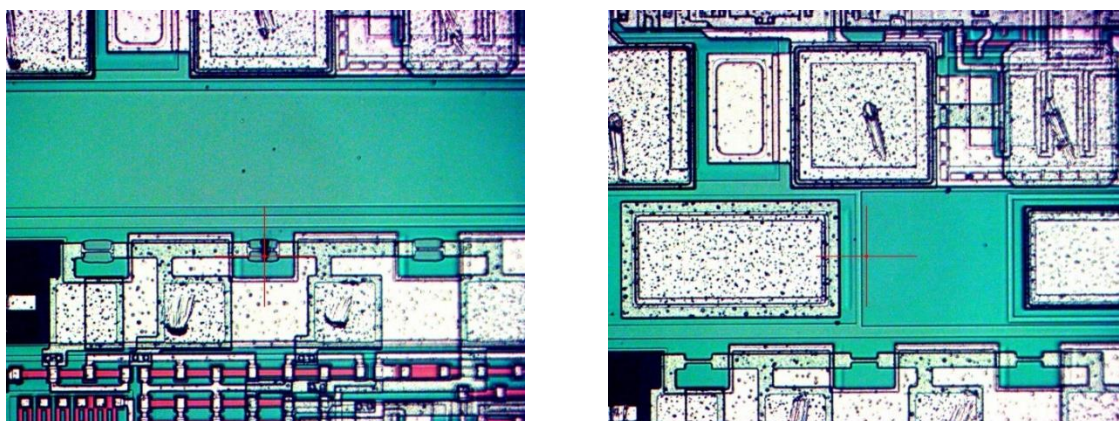


Рис. 4. Фото пережигания металлической перемычки (слева) и аналогичная область в поле зрения камеры с «лишней» информацией (металлизированные площадки) в кадре (справа)

Fig. 4. Photo of the burning of a metal jumper (on the left) and a similar area in the field of view of the camera with "extra" information (metallized pads) in the frame (on the right)

Данные проблемы могут быть устранены выбором определенной области интереса на изображении, в пределах которой есть уверенность в отсутствии подобных артефактов.

Машинное зрение, реализованное внутри программного обеспечения управления системы позиционирования и лазерной установки, позволяет не только следовать паттерну сканирования на пластине (рис. 5), но и на каждой контрольной точке автоматически контролировать и корректировать позиционирование по трем осям с микронной точностью для осуществления единообразного воздействия всех переключателей пластины.

Существующие методы лазерной сканирующей микроскопии, применяемые как в получении фотооткликов, так и при использовании сфокусированного лазерного излучения при имитации воздействия тяжелых заряженных частиц могут быть дополнены возможностями машинного зрения, например, компенсации после возврата в строку или корректировки при перемещении по заранее заданному паттерну.

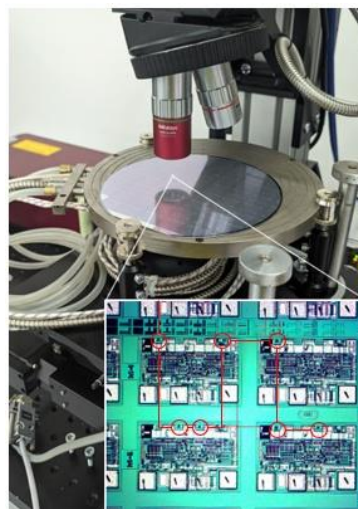


Рис. 5. Лазерная сканирующая микроскопия пластины полупроводниковых кристаллов
Fig. 5. Laser scanning microscopy of semiconductor wafer

Заключение

Машинное зрение находит применение во многих технических отраслях, а его возможности значительно повышают качество и степень автоматизации процессов. В задачах лазерной сканирующей микроскопии машинное зрение позволяет, как повысить качество позиционирования и фокусирования на участках микронных размеров, так и компенсировать несовершенства системы позиционирования и конструкции установки.

При работе с пластиной полупроводниковых кристаллов воздействию подвергаются десятки тысяч кристаллов и задача подстройки (в т.ч. пережигания переключателей) является отдельной технологической операцией, занимающей при визуальном контроле и ручной подстройке многие часы, а зачастую и дни.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Можаяев Роман К. и др. Обзор лазерных сканирующих методов исследований микронных структур. Безопасность информационных технологий, [S.l.], т. 29, № 4, с. 105–125, 2022. ISSN 2074-7136. DOI: <http://dx.doi.org/10.26583/bit.2022.4.09>. – EDN VOONPG.
2. Ukolov D., Baluev A., Gromova P., Pechenkin A., and Mozhaev R. Laser scanning confocal IR microscopy for non-destructive testing of semiconductors. Jun. 2022. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/mwent55238.2022.9802329>.
3. Baluev A.A., Ukolov D.S., Pechenkin A.A., and Mozhaev R.K. Application of Confocal Microscopy Methods for Research and Non-destructive Examination of Semiconductor Structures and Integrated Circuits. Sep. 2021. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/miel52794.2021.9569106>.
4. Дураковский А.П. и др. Маркировка и проверка подлинности изделий микроэлектроники на основе неклонированности радиационного поведения. Безопасность информационных технологий, [S.l.], т. 27, № 3, с. 18–25, 2020. ISSN 2074-7136. DOI: <http://dx.doi.org/10.26583/bit.2020.3.02>. – EDN OJD TLM.
5. Колосова А.С. и др. Возможность применения алгоритмов машинного обучения для прогнозирования качества ЭКБ и РЭА. Безопасность информационных технологий, [S.l.], т. 30, № 1, с. 123–129, 2023. ISSN 2074-7136. DOI: <http://dx.doi.org/10.26583/bit.2023.1.09>. – EDN NOBAZS.

6. Felix Beaudoin, Edward Cole, Jr. *Physics of Laser-Based Failure Analysis*, *Microelectronics Failure Analysis: Desk Reference*, 7th ed., Edited by Tejinder Gandhi, ASM International. 2019, p. 196–208. DOI: <https://doi.org/10.31399/asm.tb.mfadr7.t91110196>.
7. Печенкин А.А., Егоров А.Н., Маврицкий О.Б. и др. Расширение возможностей лазерной установки «Фемто-Т» для облучения кремниевых ИС сквозь подложку. 22-я Всероссийская научно-техническая конференция «Радиационная стойкость электронных систем» – «Стойкость-2019». 2019. – 262 с. URL: https://rusneb.ru/catalog/000200_000018_RU_NLR_BIBL_A_012096118/ (дата обращения: 20.10.2022).
8. Печенкин А.А., Савченков Д.В., Маврицкий и др. Оценка параметров чувствительности КМОП БИС по одиночным тиристорным эффектам при лазерном воздействии со стороны подложки. *Микроэлектроника*. 2015, т. 44, № 1, с. 41–48. DOI: <http://dx.doi.org/10.7868/S054412691501007X>. – EDN TCJCWP.
9. Paveleyeva E.A. Image processing and analysis based on the use of phase information. September 2018. *Computer Optics* 42(6):1022-1034. DOI: <https://doi.org/10.18287/2412-6179-2018-42-6-1022-1034>.
10. Waheed W., Deng G. and Liu B. Discrete Laplacian Operator and Its Applications in Signal Processing. *IEEE Access*, vol. 8, p. 89692–89707, 2020. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2993577>.
11. Краснящих А.В. *Обработка оптических изображений*. СПб: НИУ ИТМО, 2013. – 131 с. URL: http://oeps.ifmo.ru/uchebn/UP_OOI%20.pdf (дата обращения: 13.11.2023).
12. Mahadevkar S.V. et al. A Review on Machine Learning Styles in Computer Vision—Techniques and Future Directions. *IEEE Access*, vol. 10, p. 107293–107329, 2022. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3209825>.
13. Das A., Medhi A., Karsh R.K. and Laskar R.H. Image splicing detection using Gaussian or defocus blur. *International Conference on Communication and Signal Processing (ICCSP)*, Melmaruvathur, India, 2016, p. 1237–1241. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/ICCSP.2016.7754350>.
14. Robinson P.E. and Roodt Y. Blind deconvolution of Gaussian blurred images containing additive white Gaussian noise. *IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*, Cape Town, South Africa, 2013, p. 1092–1097. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/ICIT.2013.6505824>.
15. Bergstrom Austin & Conran David & Messinger David. (2023). Gaussian Blur and Relative Edge Response. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2301.00856>.

REFERENCES:

- [1] Mozhaev Roman K. et al. Review of laser scanning methods for microelectronic semiconductor structures investigation. *IT Security (Russia)*, [S.l.], v. 29, no. 4, p. 105–125, 2022. ISSN 2074-7136. DOI: <http://dx.doi.org/10.26583/bit.2022.4.09> (in Russian). – EDN VOONPG.
- [2] Ukolov D., Baluev A., Gromova P., Pechenkin A., and Mozhaev R. Laser scanning confocal IR microscopy for non-destructive testing of semiconductors. Jun. 2022. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/mwent55238.2022.9802329>.
- [3] Baluev A.A., Ukolov D.S., Pechenkin A.A., and Mozhaev R.K. Application of Confocal Microscopy Methods for Research and Non-destructive Examination of Semiconductor Structures and Integrated Circuits. Sep. 2021. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/miel52794.2021.9569106>.
- [4] Durakovskiy Anatoly P. et. al. The use of microelectronics radiation behavior as physical uncloned function to find counterfeit. *IT Security (Russia)*, [S.l.], v. 27, no. 3, p. 18–25, 2020. ISSN 2074-7136. DOI: <http://dx.doi.org/10.26583/bit.2020.3.02> (in Russian). – EDN OJDTLM.
- [5] Kolosova Anna S. et al. Assessment of the possibility of machine learning for electronic equipment quality prediction. *IT Security (Russia)*, [S.l.], v. 30, no. 1, p. 123–129, 2023. ISSN 2074-7136. DOI: <http://dx.doi.org/10.26583/bit.2023.1.09> (in Russian). – EDN NOBAZS.
- [6] Felix Beaudoin, Edward Cole, Jr. *Physics of Laser-Based Failure Analysis*, *Microelectronics Failure Analysis: Desk Reference*, 7th ed., Edited by Tejinder Gandhi, ASM International. 2019, p. 196–208. DOI: <https://doi.org/10.31399/asm.tb.mfadr7.t91110196>.
- [7] Pechenkin A.A., Egorov A.N., Mavritsky O.B., etc. Expanding the capabilities of the Femto-T laser installation for irradiating silicon ICS through a substrate. The 22nd All-Russian Scientific and Technical Conference "Radiation resistance of electronic systems" – "Resistance-2019". 2019. – 262 p. URL: https://rusneb.ru/catalog/000200_000018_RU_NLR_BIBL_A_012096118/ (accessed: 13.11.2023).
- [8] Pechenkin A.A., Savchenkov D.V., Mavritskii O.B., Chumakov A.I., Bobrovskii D.V. Evaluation of sensitivity parameters for single event latchup effect in cmos lsi ics by pulsed laser backside irradiation tests. *Russian Microelectronics*. 2015, v. 44, no. 1, p. 33–39. DOI: <http://dx.doi.org/10.7868/S054412691501007X>. – EDN TCJCWP.

- [9] Pavelyeva E.A. Image processing and analysis based on the use of phase information. September 2018. Computer Optics 42(6):1022-1034. DOI: <https://doi.org/10.18287/2412-6179-2018-42-6-1022-1034>.
- [10] Waheed W., Deng G. and Liu B. Discrete Laplacian Operator and Its Applications in Signal Processing. IEEE Access, vol. 8, p. 89692–89707, 2020. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2993577>.
- [11] Krasnyashikh A.V. Optical image processing. – Saint-Petersburg: NIU ITMO, 2013. – 131 p. URL: http://oeps.ifmo.ru/uchebn/UP_OOI%20.pdf (accessed: 13.11.2023) (in Russian).
- [12] Mahadevkar S.V. et al. A Review on Machine Learning Styles in Computer Vision—Techniques and Future Directions. IEEE Access, vol. 10, p. 107293–107329, 2022. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3209825>.
- [13] Das A., Medhi A., Karsh R.K. and Laskar R.H. Image splicing detection using Gaussian or defocus blur. International Conference on Communication and Signal Processing (ICCSP), Melmaruvathur, India, 2016, p. 1237–1241. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/ICCSP.2016.7754350>.
- [14] Robinson P.E. and Roodt Y. Blind deconvolution of Gaussian blurred images containing additive white Gaussian noise. IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT), Cape Town, South Africa, 2013, p. 1092–1097. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/ICIT.2013.6505824>.
- [15] Bergstrom Austin & Conran David & Messinger David. (2023). Gaussian Blur and Relative Edge Response. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2301.00856>.

*Поступила в редакцию – 21 октября 2023 г. Окончательный вариант – 25 ноября 2023 г.
Received – October 21, 2023. The final version – November 25, 2023.*