МЕЖПРОЦЕССНЫЙ КОНТРОЛЬ КРИТИЧЕСКИХ РАЗМЕРОВ МЭМС-ЭЛЕМЕНТОВ В ПРОИЗВОДСТВЕ

INTERPROCESS CONTROL OF CRITICAL DIMENSIONS IN PRODUCTION OF MEMS

УДК 621.382; БАК 05.27.01; DOI: 10.22184/1993-8578.2018.84.5.328.334

Н.Израилов^{1,2}, А.Казачков¹, И.Род^{1,2}, А.Исаченко¹, Д.Шамирян¹ / nikita.izrailev@mapperllc.ru, artem.kazachkov@mapperllc.ru
N.Izrailev^{1,2}, A.Kazachkov¹, I.Rod^{1,2}, A.Isachenko¹, D.Shamiryan¹

В статье приведены результаты разработки программного обеспечения (ПО) для автоматического анализа оптических изображений. С использованием алгоритма выделения границ Дерише ПО рассчитывает геометрические параметры микроструктур на изображениях, полученных при помощи автоматизированной оптической системы в рамках межпроцессного контроля критических размеров (КР) МЭМС-продукции. Подобный контроль КР является одним из инструментов системы управления качеством в производстве МЭМС. Разработанная методика позволяет с высокой точностью определять критические размеры чипов, расположенных на кремниевой или стеклянной пластине. Полная оптическая инспекция одной пластины диаметром 100 мм вместе с обработкой изображений занимает менее 10 мин. Хотя разработанное ПО предназначено для контроля параметров пластин определенных типов и размеров, использованные алгоритмы допускают значительное расширение его функциональности в будущем.

The paper presents the results of the development of the script for the analysis of optical images. Using Deriche's boundary delimitation algorithm, the analysis script allows obtaining critical dimensions (CD) of micro-sized structures captured by an automated optical system. The monitoring of the geometrical parameters of the MEMS products after various technological processes helps to control the processes' performance which is strictly required by the quality management system maintained in the MEMS manufacturing. The developed technique allows to determine with a high accuracy the critical dimensions of chips located on a silicon or glass wafer. A complete optical inspection of one 100 mm wafer together with image processing takes less than 10 minutes. Although the developed script is designed to control the parameters of wafers of certain types and sizes, the algorithms used allow for a significant expansion of its functionality in the future.

Современное высокотехнологичное производство микроэлектромеханических систем (МЭМС) не может функционировать без развитой и хорошо управляемой системы контроля качества. Именно система контроля качества позволяет не только эффективно прогнозировать, но и минимизировать или же полностью предотвращать возможные риски в производстве, эффективно улучшать технологические процессы, обеспечивая своевременную поставку продукции, полностью отвечающей требованиям заказчика. Один из инструментов системы

управления качеством описан в [1], где представлена методика, позволяющая своевременно детектировать дефекты оптической литографии в МЭМС-элементах и корректировать технологический процесс, тем самым повышая долю выхода годных изделий и не допуская доставку дефектной продукции заказчику. Настоящая работа посвящена другому важному инструменту системы управления качеством, который предназначен для мониторинга геометрических параметров продукции на разных производственных этапах. Мониторинг критических размеров структур МЭМС-элементов

¹ ООО "Мэппер" (109316, Москва, Волгоградский пр. 42, корп. 5) / Mapper LLC (42-5, Volgogradsky prosp., Moscow, 109316, Russia).

² Московский физико-технический институт (государственный университет) (141701, Московская область, Долгопрудный, Институтский пер., 9) / Moscow Institute of Physics and Technology (State University) (9 Institutskiy per., Dolgoprudny, Moscow Region, 141701, Russia).

после процессов оптической литографии, травления оксида, глубокого травления кремния, напыления пленок позволяет не только устанавливать и прослеживать зависимости между параметрами вышеназванных процессов и их результатами, но также и следить за возникновением несоответствий в процессах и корректировать эти отклонения.

Наиболее распространенной технологией контроля критических размеров МЭМС является оптическая инспекция. Ручная оптическая инспекция требует больших временных затрат и сопряжена с рисками, связанными с ошибками операторов производства [2]. На рынке оптических приборов предлагаются достаточно развитые решения для контроля геометрических параметров топологических структур (например, [3, 4]), но во многих случаях такие приборы имеют очень высокую цену. В данной статье мы расскажем о методике автоматизированной обработки изображений, полученных при помощи автоматизированной оптической системы. Стоимость такого

решения не превышает 13 тыс. евро, а система отвечает всем требованиям инспекции геометрических размеров МЭМС. Разработанная методика позволяет с требуемой точностью определять критические размеры сотен чипов, располагающихся на кремниевой или стеклянной пластине диаметром 100 мм. Полная оптическая инспекция одной пластины вместе с обработкой изображений занимает менее 10 мин, а выполнение той же операции на ручном оборудовании требует нескольких часов при нестабильной точности определения критических размеров из-за субъективной ("на глаз") оценки оператором границы измеряемой структуры.

ОПИСАНИЕ МЕТОДИКИ

В рамках автоматизации производства и улучшения контроля качества технологических процессов ООО "Маппер" был разработан программный продукт на языке ImageJ macro language [5] для обработки оптических изображений чипов на пластине и определения критических

Modern high-tech production of microelectromechanical systems (MEMS) can not function without a developed and well-managed quality control system. The quality control system allows not only to effectively forecast, but also minimize or completely prevent possible risks in production, to effectively improve the processes, ensuring the timely delivery of products that fully meet the requirements of the customer. One of the tools of the quality management system is described in [1], where a technique is presented that allows timely detection of defects in optical lithography in MEMS cells and corrects the process, thereby increasing the yield and not allowing the delivery of defective products to the customer. This paper is devoted to another important tool of the quality management system, which is designed to monitor the geometric parameters of products at different production stages. Monitoring of the critical

dimensions of the MEMS structures after the processes of optical lithography, etching of oxide, deep etching of silicon, deposition of films allows not only to establish and to trace the dependencies between the parameters of the above processes and their results, but also to monitor the occurrence of inconsistencies in processes and to correct these deviations.

The most common technology for controlling the critical dimensions of MEMS is optical inspection. Manual optical inspection requires a lot of time and involves risks associated with the errors of production operators [2]. The market of optical instruments offers sufficiently developed solutions for controlling the geometric parameters of topological structures (for example, [3, 4]), but in many cases such devices have a very high price. In this article, we describe the technique of automated processing of images obtained with the help of an automated optical system. The cost

of such a solution does not exceed 13 thousand euros, and the system meets all the requirements of inspection of MEMS geometry. The developed technique allows to determine with the required accuracy the critical dimensions of hundreds of chips located on a 100 mm silicon or glass wafer. A complete optical inspection of one wafer together with image processing takes less than 10 minutes, and the same operation on manual equipment requires several hours with unstable accuracy in determining critical dimensions due to subjective (by eye) evaluation of the boundary of the measured structure by the operator.

DESCRIPTION OF METHOD

In the framework of automation of production and improvement of quality control of processes, Mapper LLC developed a script in the ImageJ macro language [5] for processing optical images of chips on a wafer and determining the critical dimensions of specified structures.

Рис.1. Структурная схема автоматизированной оптической системы определения геометрических параметров топологических структур

Fig.1. Structural diagram of automated optical system for determining geometric parameters of topological structures

размеров заданных структур. Программное обеспечение (ПО) анализирует изображения, собирает данные о геометрических размерах в отдельный файл, а затем проверяет их на соответствие требованиям заказчика. Далее эта информация используется при принятии решения об отправлении пластины на следующий производственный этап или же на переработку. В сравнении с процедурой ручного контроля, автоматический способ позволяет увеличить производительность, а также исключить из контроля человеческий фактор.

Разработка и тестирование программы проводились на серии изображений, полученных с помощью автоматизированной оптической системы компании "Маппер". Схема данной оптической системы представлена на рис.1. На моторизированный столик по очереди подаются пластины диаметром 100 мм. Снятие изображений выполняется с заданной фокусировкой. Управление перемещением столика выполняется на основе протокола снятия таким образом, чтобы получить изображения всей интересующей поверхности. При обработке полученных снимков выполняется автоматическое сшивание кадров в общее изображение поверхности элемента. Полученное шитое изображение подается на вход программе для получения данных о критических параметрах поверхностных структур.

Сформированное изображение имеет высокое разрешение, вследствие чего его размер в оперативной памяти может достигать нескольких гигабайт. Поскольку алгоритм обработки изображения

Script analyzes images, collects data about geometric dimensions in a separate file, and then checks them for compliance with customer requirements. Further, this information is used when deciding whether to send the wafer to the next production stage or for recycling. In comparison with the manual control procedure, the automatic method allows to increase the productivity, as well as to exclude the human factor from control.

The development and testing of the script was carried out on a series of images obtained with the help of the automated

optical system used by Mapper. The scheme of this optical system is shown in Fig.1. The 100 mm wafers are placed in turn on the motorized table. Images are taken with the specified focus. The movement control of the table is performed on the basis of the capturing protocol in such a way as to obtain images of the entire surface of interest. During processing of the captured images, the frames are automatically stitched into a general image of the surface of the element. The resulting stitched image is fed to the script input to obtain data on the critical parameters of the surface structures.

The generated image has a high resolution, so that its size in RAM can reach several gigabytes. Because the image processing algorithm is also resource-intensive, only selected significant areas of the stitched image are allocated and processed for saving memory. Thanks to this, a gain in the speed of computation without loss of accuracy is achieved. Since the accuracy of recognizing the boundaries of microstructures is determined by the pixel size, optical systems with a higher resolution will provide greater accuracy of the final result.

In addition to the image, the script loads a configuration file

также ресурсоемкой, для экономии памяти на снимке изображения выделяются и отправляются на обработку только отдельные значимые участки. Благодаря этому достигается выигрыш в скорости вычислений без потери точности. Поскольку точность нахождения границ микроструктур определяется размером пикселя, то оптические системы с более высоким разрешением будут обеспечивать большую точность конечного результата.

Помимо изображения, программа принимает на вход конфигурационный файл с указанными в нем настройками анализа и предоставляет на выходе результирующий файл с критическими параметрами структур и их статистическим распределением. Преимуществом данного подхода является то, что на вход может подаваться не только единичное изображение, но и целая серия изображений определенного типа. Программа способна автоматически выявлять несоответствия размеров структур, опираясь на технические требования заказчика продукции. Правильность загруженного конфигурационного файла определяется программой также автоматически, и она своевременно предупреждает пользователя в случае, если загрузка была произведена ошибочно.

Проверка эффективности и точности алгоритма осуществлялась методом двойного слепого тестирования. Анализ изображения начинается с того, что пользователь указывает референсную позицию на изображении. Используя

ее, алгоритм высчитывает оптимальное расстояние между структурами и компенсирует отклонения в углах, появившиеся вследствие неточной загрузки пластины в оптическую систему. Помимо этого, отталкиваясь от референсной позиции, алгоритм с некоторым шагом сегментирует изображение пластины (ввиду его большого размера), выделяя границы структур, и находит их параметры. В тот момент, когда изображение полностью обработано согласно заданным настройкам, программа завершает работу.

Центральный алгоритм программного обеспечения основан на методе выделения границ Дерише (Deriche) [6], который, в свою очередь, был создан на базе соответствующего метода Кэнни (Canny) [7]. В сравнении с реализациями других методов преимуществом алгоритма Дерише является высокая степень как локализации границ, так и шумоподавления. Помимо этого, метод Дерише удобен с точки зрения наличия лишь одного параметра (α), управляющего соотношением между локализацией и шумоподавлением – его уменьшение ведет к ухудшению локализации и улучшению отношения сигнал-шум и наоборот, что было подтверждено в дальнейшем исследовании.

Чтобы определить оптимальное значение параметра α , была проведена серия экспериментов на границах структур, осложненных приграничными дефектами. Анализ тестовых изображений был проведен для четырех значений

with the analysis settings and provides the resulting file with critical parameters of the structures and their statistical distribution. The advantage of this approach is that not only a single image, but also a whole series of images of a certain type can be input. The script is able to automatically detect inconsistencies in the size of structures, based on the technical requirements of the customer. The correctness of the loaded configuration file is also determined automatically by the script and it promptly warns the user in case the download was made incorrectly.

The efficiency and accuracy of the algorithm were verified by double-blind testing. Image analysis begins with the user indicating a reference position in the image. Using it, the algorithm calculates the optimal distance between the structures and compensates for the deviations in the corners that appeared due to inaccurate loading of the wafer into the optical system. In addition, starting from the reference position, the algorithm segments the image of the wafer with a certain step (due to its large size), highlighting the boundaries of the structures, and finds their parameters. At the moment when the image is

fully processed according to the settings, the script finishes.

The central software algorithm is based on the Deriche's boundary method [6], which, in turn, was created on the basis of the corresponding Canny method [7]. In comparison with the implementation of other methods, the advantage of the Deriche's algorithm is a high degree of both localization of the boundaries and noise suppression. In addition, the Deriche's method is convenient from the point of view of the presence of only one parameter (α) controlling the relation between localization and noise reduction: its decrease leads to a deterioration

Рис. 2. Оригинальное оптическое изображение с гистограммой распределения интенсивности (а) и преобразованные изображения и гистограммы интенсивности вдоль отрезка после выделения границ методом Дериче при следующих значениях параметра α : b – $\alpha = 4$; c – $\alpha = 2$; d – $\alpha = 1$; e – $\alpha = 0,5$

Fig.2. Original optical image with intensity distribution histogram (a) and converted images and intensity histograms along section after delimitation by Deriche's method at following values of α : b – $\alpha = 4$; c – $\alpha = 2$; d – $\alpha = 1$; e – $\alpha = 0.5$

of the localization and an improvement in the signal-to-noise ratio and vice versa, which was confirmed in the further study.

To determine the optimum value of the parameter α , a series of experiments was carried out at the boundaries of structures complicated by boundary defects. Analysis of the test images was carried out for four values of the parameter α : 4; 2; 1; 0.5. For each value of α along the segment that intersects both the structure boundary and the defect, intensity charts were plotted (Fig.2). The defect is not part of the structure and should not be defined as its boundary. To

determine the optimality, the criterion "one boundary – one response" was used.

Fig.2a shows the original image with a change in intensity at the boundary of the structure and the defect adjacent to it. For $\alpha = 4$ (Fig.2b), the algorithm does not work optimally, since for one boundary there are at once three equivalent responses: from the boundary itself, as well as from the left and right sides of the defect. At $\alpha = 2$ (Fig.2c), there are no significant changes in the intensity plot, but one can see the effect of suppressing the response from the defect boundaries.

The value $\alpha = 1$ recommended in [6] (Fig.2d) shows a significant improvement in the determination of the structure boundary: the difference in intensity between the boundary and the defect becomes noticeably larger. However, in the course of the study it was revealed that $\alpha = 0.5$ (Fig.2e) makes this difference even more noticeable without significant damage to the localization of the boundary. The conducted experiments also testify to the superiority of using the value $\alpha = 0.5$, showing that at $\alpha = 1$ suppression of some of the deepest and largest defects is not sufficient to achieve the optimality criterion,

параметра α : 4; 2; 1; 0,5. Для каждого значения α вдоль отрезка, пересекающего как границу структуры, так и дефект, были построены графики интенсивности (рис.2). Дефект не является частью структуры и не должен определяться в качестве ее границы. Для определения оптимальности был использован критерий "одна граница – один отклик".

На рис.2а показано оригинальное изображение с изменением интенсивности на границе структуры и прилегающем к ней дефекте. При $\alpha = 4$ (рис.2b) алгоритм работает не оптимально, так как для одной границы находится сразу три равнозначных отклика: от самой границы, а также от левой и правой сторон дефекта. При $\alpha = 2$ (рис.2с) не происходит существенных изменений в графике интенсивности, однако можно заметить эффект подавления отклика от границ дефекта.

Рекомендованное в работе [6] значение $\alpha = 1$ (рис.2d) показывает значительное улучшение определения границы структуры: разница в интенсивности между границей и дефектом становится заметно больше. Однако в процессе исследования было выявлено, что $\alpha = 0,5$ (рис.2e) делает эту разницу еще заметнее

без существенного ущерба для локализации границы. В пользу значения $\alpha = 0,5$ говорят и проведенные эксперименты, которые показали, что при $\alpha = 1$ подавление некоторых наиболее глубоких и крупных дефектов бывает не достаточным для достижения критерия оптимальности, что делает невозможным правильное определение критических размеров структуры.

Полученное ПО, благодаря сегментированию изображения и использованию метода Дерише с подобранным оптимальным значением параметра $\alpha = 0,5$, способно обрабатывать изображение размером 2 Гб примерно за 2 мин. Алгоритм эффективно выявляет нужные границы и отделяет их от границ дефектов, находя критические размеры микроструктур. Также реализована обработка серии изображений, контроль за измеряемыми параметрами по ходу подсчета, контроль за ошибками пользователя при загрузке рецепта и вывод полученных результатов в отдельный файл со статистической обработкой.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье представлена совокупность алгоритмов обработки изображений, реализованных

на языке ImageJ macro language. С их помощью автоматизирован межпроцессный контроль геометрических размеров МЭМС-элементов на фабрике "Маппер". Результаты исследования алгоритма выделения границ Дериче позволили определить оптимальное значение параметра α . Для улучшения гибкости алгоритмов и возможности использования их для разных геометрий выпускаемой продукции были разработаны специальные конфигурационные файлы и предусмотрена возможность их создания с пользовательскими настройками.

Хотя разработанное ПО предназначалось для контроля параметров лишь определенных пластин, использованные алгоритмы допускают значительное расширение его функциональности в будущем. Внедрение программы на производстве компании "Маппер" позволило исключить влияние человеческого фактора на процессы измерения и сократить время контроля как отдельных пластин, так и их партий.

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

1. Заблоская Е.Ю., Род И.А., Таренкин А.И., Казачков А.О., Шамирян Д.Г. Автоматизированная инспекция дефектов литографии как метод контроля качества МЭМС-элементов // Нано- и микросистемная техника. 2017. Т. 19. № 10. С. 605-613. Zablotskaya E.Yu., Rod I.A., Tarenkin A.I., Kazachkov A.O., Shamiryan D.G. Automated Detection of Lithography Defects as a Method of Quality Management for MEMS Elements. Nano- and microsystems technology. 2017. Vol. 19. No. 10. P. 605-613.
2. Toyoda Y., Shindo H., Hojo Y., Fuchimoto D. SEM-contour shape analysis based on circuit structure for advanced systematic defect inspection. Proceedings Volume 9050, Metrology, Inspection, and Process Control for Microlithography XXVIII. 2014. 90502V.
3. Фалк Г. Гибкие решения для оптического контроля качества // НАНОИНДУСТРИЯ. 2018. № 1. С. 24-27. Falk G. Flexible solutions for optical quality control. NANOINDUSTRY. 2018. No. 1. P. 24-27.
4. Tencor Introduces New Metrology Systems for Leading-Edge Integrated Circuit Device Technologies. MILPITAS, Calif., Feb. 22, 2017 // PRNewswire. Available at: <http://ir.kla-tencor.com/news-releases/news-release-details/kla-tencor-introduces-new-metrology-systems-leading-edge>. (Accessed 30 July 2018).
5. ImageJ macro language information. Available at: <https://imagej.nih.gov/ij>. (Accessed 30 July 2018).
6. Deriche R. Using Canny's criteria to derive a recursively implemented optimal edge detector. Int. J. Computer Vision. April 1987. V. 1. P. 167-187.
7. Canny J. A Computational Approach To Edge Detection. IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence. 1986. V. 8. No 6. P. 1986679-698.

which makes it impossible to correctly determine the critical dimensions of the structure.

The resulting software, thanks to the segmentation of the image and the use of the Deriche's method with a matched optimal value of $\alpha = 0.5$ is capable of processing an image of 2 gigabytes in about 2 minutes. The algorithm effectively identifies the necessary boundaries and separates them from the boundaries of defects, finding the critical dimensions of microstructures. It also implements the processing of a series of images, monitoring of measured parameters during the counting process, monitoring of

user errors when downloading the recipe, and outputting the results to a separate file with statistical processing.

CONCLUSION

The article presents a set of image processing algorithms implemented in the ImageJ macro language. With their help, the inter-process control of the geometric dimensions of MEMS elements at the Mapper factory is automated. The results of the study of the Deriche's boundary detection algorithm allowed us to determine the optimal value of the parameter α . To improve the flexibility of the

algorithms and the ability to use them for different geometries of the products, special configuration files were developed and the possibility of their creation with user settings was provided.

Although the script was designed to control the parameters of only certain wafers, the algorithms allow a significant expansion of its functionality in the future. The implementation of the software at Mapper's production allowed to exclude the influence of the human factor on the measurement processes and to shorten the time for monitoring both individual wafers and their batches. ■