



# ОБ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЕ ДЕТЕКТИРОВАНИЯ ДЕФЕКТОВ НА МЭМС-ПРОИЗВОДСТВЕ

## AUTOMATED DEFECT DETECTION SYSTEM IN MEMS MANUFACTURING

DOI: 10.22184/1993-8578.2018.11.7-8.542.548

К.В.Ракетов<sup>1,2</sup>, Н.Ю.Израилев<sup>1,3</sup>, А.О.Казачков<sup>1</sup>, Е.Ю.Заблоцкая<sup>1</sup>, И.А.Род<sup>1</sup>, М.С.Рябков<sup>1,4</sup>, А.В.Исаченко<sup>1</sup>, Д.Г.Шамярян<sup>1</sup>  
K.V.Raketov<sup>1,2</sup>, N.Yu.Israilev<sup>1,3</sup>, A.O.Kazachkov<sup>1</sup>, E.Yu.Zablotskaya<sup>1</sup>, I.A.Rod<sup>1</sup>, M.S.Ryabkov<sup>1,4</sup>, A.V.Isachenko<sup>1</sup>, D.G.Shamiryani<sup>1</sup>

Хорошо отлаженные системы контроля и инспекции продукции на различных технологических стадиях играют ключевую роль в обеспечении гибкости производства, в постоянном улучшении производственных процессов и сокращении производственных потерь. В МЭМС-производстве зачастую для этих целей используется автоматизированная оптическая инспекция, результатом которой является большое количество изображений, требующих обработки и анализа. В данной статье представлены результаты по внедрению в ООО "МАППЕР" автоматизированной системы детектирования дефектов литографии, базирующейся на программном обеспечении для обработки изображений, разработанном специально для этих целей компанией ООО "АКСАЛИТ Софт".

Well-established systems of control and inspection of products at various technological stages play a key role in ensuring production flexibility, in continuous improvement of production processes and reduction of production losses. In MEMS production, an automated optical inspection is often used for these purposes, the result of which is a large number of images that require processing and analysis. This article presents the results of the implementation of the automated system for detecting defects of lithography, based on software for image processing, developed specifically for this purpose by AKSALIT Soft, at MAPPER.

### ВВЕДЕНИЕ

На современных МЭМС-производствах повышение выхода готовой продукции является одной из приоритетных задач. Это в первую очередь достигается за счет непрерывного улучшения технологических и производственных процессов, влияющих на конечный продукт. Система управления качеством на уровне производственного процесса включает в себя следующие мероприятия:

- тщательный выбор поставщиков сырья и расходных материалов;
- входной контроль пластин;
- межпроцессный мониторинг параметров продукции;

- финальная верификация параметров продукции на предмет удовлетворения требованиям заказчика.

Межпроцессный мониторинг параметров продукции на ранних стадиях изготовления позволяет не только вовремя отбраковывать дефектные изделия, но и отправлять их на переработку. Так, наличие дефектоскопии после технологического этапа оптической литографии на МЭМС-производстве, когда структура проявлена в слое фоторезиста, нанесенного на пластину, позволяет распознать критические дефекты в продукции и дает возможность снятия слоя фоторезиста и повторения шага литографии без потери пластины, а значит, и без падения уровня выхода годной продукции [1, 2].

<sup>1</sup> ООО "МАППЕР".

<sup>2</sup> Национальный исследовательский технологический институт "МИСиС".

<sup>3</sup> Московский физико-технический институт.

<sup>4</sup> ООО "АКСАЛИТ Софт".



На МЭМС-производствах дефектоскопия может осуществляться на базе различных методик измерения. Одна из методик – оптическая инспекция в ручном или автоматическом режимах. В нашей ранней работе [3] была предложена методика обнаружения дефектов после этапа оптической литографии с помощью автоматизированной системы оптической инспекции (АСОИ) пластин, разработана классификация дефектов литографии и описаны возможные причины их возникновения. В данной статье приведены результаты эффективного внедрения АСОИ в производство МЭМС-продукции ООО "МАППЕР", которое стало возможным в том числе благодаря разработке программного обеспечения (ПО) для быстрого анализа изображений, полученных при помощи АСОИ. Особенности ПО являются достаточно большая пропускная способность и наличие системы автоматической классификации дефектов, основанной на модели искусственной нейронной сети [4]. Для доказательства эффективности внедренной системы было проведено сравнение результатов автоматизированной системы детектирования дефектов (АСДД) и ручной оптической инспекции (РОИ), осуществляемой операторами полупроводникового производства. Согласно результатам исследования, ручная оптическая инспекция позволяет выявлять только от 12 до 50% дефектов литографии по сравнению с АСДД.

### ОПИСАНИЕ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ДЕТЕКТИРОВАНИЯ ДЕФЕКТОВ

Детальное описание технической части АСОИ было представлено в работе [3]. Подобные системы оптической инспекции позволяют получать полное

изображение поверхности пластины, на которой проявлены структуры в светочувствительном фоторезисте. Полное изображение образуется путем покадрового съема и последующей сшивки более мелких изображений, полученных при помощи камеры с определенным полем зрения. Разрешение отдельного изображения является ограничением для размера дефекта, который система сможет зафиксировать, и задается техническими характеристиками ПЗС-матрицы камеры и объектива. Для детектирования достаточно мелких дефектов необходимо использовать оптическую систему, обеспечивающую высокое разрешение изображений, но в таком случае пропускная способность системы может оказаться неприемлемо низкой для использования в производственной линии. Поэтому при выборе АСОИ необходимо искать компромисс между этими двумя параметрами: разрешающей способностью и пропускной способностью системы. Как показано в [5], пропускная способность оптической системы уменьшается обратно пропорционально квадрату ее разрешения. На практике компромиссным решением может быть параллельное использование двух модулей в одной АСОИ: первый модуль позволяет быстрое сканирование всей поверхности пластины и получение изображений с пониженным разрешением с целью распознавания дефектов, тогда как второй модуль позволяет получать изображение с повышенным разрешением критичных зон на элементе с целью классификации дефектов.

АСДД представляет собой комплекс операций, включающий в себя получение изображений с помощью АСОИ, анализ полученных изображений

### INTRODUCTION

Higher output of finished products is one of priorities at the modern MEMS factories. This task is achieved, above all, by continuous improvement of technologies and production processes that affect the final product. The quality management system at the level of the production process includes the following activities:

- careful selection of raw materials and consumables suppliers;
- incoming wafer control;
- interprocess monitoring of product parameters;

- final verification of product parameters to meet customer requirements.

Interprocess monitoring of product parameters at the early stages of manufacturing allows not only to reject defective products in time, but to send them for recycling. So, the presence of flaw detection after the technological stage of optical lithography at MEMS production, when the structure is developed in a layer of photoresist deposited on a plate, makes it possible to identify critical defects in products and enables to remove the photoresist layer and

repeat the lithograph step without losing the plate, and, therefore, without dipping the product output level [1, 2]. At MEMS productions, flaw detection can be carried out on the basis of various measurement methods. One of the methods – optical inspection in manual or automatic modes. In our earlier work [3], a technique was proposed for detecting defects after a stage of optical lithography using an automated optical inspection system (ASOI) of plates, a classification of lithography defects was developed and possible causes of their occurrence were described.

и классификацию найденных дефектов в специализированном ПО, разработанном компанией ООО "АКСАЛИТ Софт". Данное ПО обладает способностью к самообучению, встроенной базой данных дефектов и нейронной сетью для классификации найденных объектов.

### ПРИНЦИПЫ РАСПОЗНАВАНИЯ ДЕФЕКТОВ И ИХ КЛАССИФИКАЦИИ

Классификация дефектов по типам происходит после нахождения контуров дефектов на изображении. Для вычисления контуров производится сегментация объектов на изображении. Сегментация объектов на изображении реализована с помощью функции Adaptive Thresholding [6]. Функция Adaptive Thresholding преобразует исходное изображение в бинарное, где белые пиксели – часть искоемых объектов, темные – фон. Для сглаживания и восстановления контуров объектов использованы морфологические функции Opening, Closing и Cutting [7]. Функция поиска контуров (преобразование бинарных масок в числовой массив) реализована с помощью алгоритма Suzuki85 [8].

После того как объект найден системой на изображении, происходит его классификация по следующим параметрам:

- "площадь контура",
- "круглый фактор формы",
- "вытянутый фактор формы",
- "суммарная площадь внутренних контуров",
- "цветность пикселей контура",
- "яркость пикселей контура",

- "средний тон пикселей контура",
- "эквивалентный кругу диаметр".

Для каждой характеристики всех объектов в системе вычисляются среднее значение, среднеквадратическое отклонение и вес. Затем нейронная сеть классифицирует найденные объекты по принципу поиска максимальной близости характеристик текущего объекта с характеристиками объектов в БД сравнением типа "каждый с каждым". При этом в базе данных объектов хранятся пары: ключ (тип объекта) – значение (характеристики).

### ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ АСДД

На рис.1 представлены изображения дефектов литографии, полученные АСОИ (слева) и обнаруженные описанным выше программным обеспечением (справа). Проявленное в светочувствительном фоторезисте круглое отверстие диаметром 100 микрон содержит дефект внутри: на верхнем изображении дефект не касается границ отверстия, а на нижнем – касается. На изображении в центре – дефект располагается вне структуры в фоторезисте.

Специализированное ПО анализирует полученное с помощью оптического микроскопа изображение, распознает объекты, классифицирует их согласно описанному выше алгоритму и строит сетку из треугольников, в вершинах которых находятся обнаруженные дефекты (рис.2а). Каждому типу дефектов присваивается имя согласно ранее созданной классификации, описанной в работе [3]. Подобная триангуляция позволяет визуализировать местоположение дефектов, даже если они настолько

In this paper we present the results of effective ASOI implementation in the MEMS-production by MAPPER which become possible due to software development for rapid analysis of the images obtained using ASOI.

A software has a sufficient computation capacity and a system of automatic defect classification based on an artificial neural network model [4].

In order to prove effectiveness of the implemented system we have compared the results of the automatic defect detection system (ASDD) and the manual optical inspection (MOI) applied

by operators of semiconductor manufacturers.

According to this research, the manual optical inspection allows to detect from 12% to 50% of lithography defects as compared with ASDD.

### ASDD DESCRIPTION

Detailed technical description of ASDD was presented in [3]. Such systems allow to obtain a full image of plate surface where structures in photosensitive photoresist layer have been detected. Full image is formed by frame-by-frame image removal and following lacing of smaller images

received from camera with certain field of vision. Resolution of a separate image limits a defect size which can be fixed by a system and is determined by specifications of CCD-matrix of camera and the lens. It is necessary to use an optical system which provides a computing may be unacceptably low for use in a production line. Because of this fact it is necessary to seek a compromise between these two parameters – resolution ability and throughput capacity of the system. It was shown [5], that a throughput the optical system decreases inversely the square of its resolution. In practice, a

малы, что шитое изображение всей поверхности элемента не позволяет заметить дефект глазом на таком изображении (см. пример маленького дефекта на рис.2б).

### СРАВНЕНИЕ АСДД И РОИ

Сравнение двух систем инспекции дефектов, автоматизированной системы детектирования дефектов и ручной оптической инспекции показало, что использование АСДД позволяет выявить большее количество дефектов. На рис.3 представлена диаграмма количества распознанных дефектов литографии для пяти различных элементов. При построении диаграммы размаха для РОИ медиана равна 22% (по отношению к количеству дефектов, найденных в АСДД). Такое различие в обнаружении дефектов обусловлено влиянием человеческого фактора. Кроме того, после РОИ необходимо провести дополнительную классификацию дефектов по типам в ручном режиме. АСДД позволяет исключить влияние человеческого фактора на нахождение дефектов и автоматически классифицировать их согласно релевантной БД дефектов. Кроме того, АСОИ дает возможность совмещать инспекцию на наличие дефектов с межпроцессным мониторингом параметров процесса. В результате это приводит к минимизации количества манипуляций над пластиной. Проведенные тесты показали, что время, затраченное на АСДД и РОИ, примерно одинаково. В табл.1 приведено полное сравнение ручной оптической и автоматической инспекций на основе всех вышеописанных

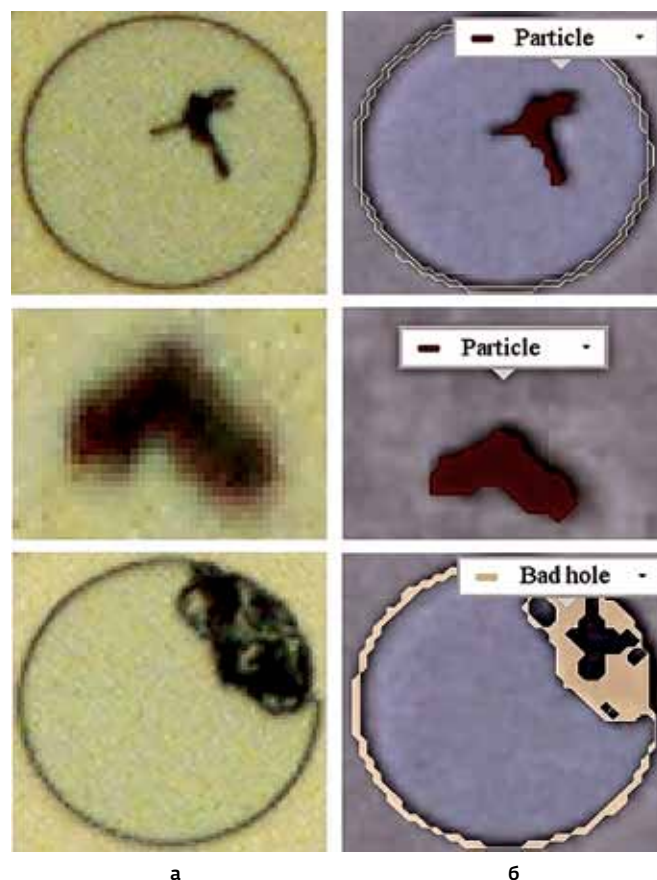


Рис.1. Примеры обнаружения дефектов литографии: а – оптическое изображение в светлом поле, б – результат распознавания дефектов при помощи АСДД

Fig.1. Examples of detection of lithography defects: a – optical image in a light field, b – results of defects detected using ASDD

compromise solution may be a parallel use of both modules in one ASOI: the first module allows to scan all plate's surface rapidly at low resolution to detect defects while the second module is used to get a high resolution image of critical zones on an element with an aim to classify a defects. ASDD is a complex of operations to obtain images using ASOI, analyze received images and classify defects in the special software developed by AKSALIT Soft.

The software has a self-learning ability intrinsic data base and neural network to classify the detected defects.

### PRINCIPLES OF DEFECTS DETECTION AND THEIR CLASSIFICATIONS

Classification of defects by types takes place after detecting their contours on an image. Segmentation of objects in an image is used to calculate contours.

Segmentation of objects is accomplished by using Adaptive Thresholding function [6]. This function converts the initial image into the binary image, where white pixels are part of objects to be found, and dark ones make the background. Morphological functions Opening, Closing and Cutting [7] are necessary to mute and restore the contours of objects.

Contour finding function (transforming binary masks into the digital data) is realized using Suzuki85 algorithm [8].

After an object has been found by system in the image, its classification takes place according to the following parameters:

- "contour area",
- "round form factor",
- "elongated form factor",
- "total area of internal contours",
- "contour pixel color",
- "brightness of contour pixels",
- "contour pixel average tone",
- "circle equivalent diameter".

For each characteristic of all objects in a system the mean value,

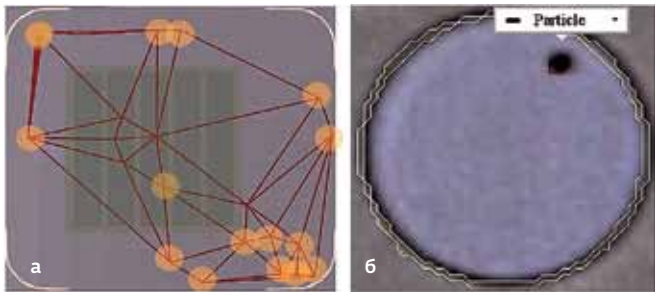


Рис.2. Результат распознавания дефектов литографии МЭМС-элемента при помощи АСДД. а – полная поверхность элемента. Зеленым цветом выделены структуры, относящиеся к МЭМС-элементу; красная линия соединяет позиции распознанных литографических дефектов. Оранжевым показаны дефекты, не обнаруженные оператором полупроводникового производства в ручном режиме. б – вырезка конкретного дефекта литографии, находящегося внутри структуры элемента, как пример дефекта, распознанного при помощи АСДД и не обнаруженного оператором по причине слабого оптического контраста.

Fig.2. The result of a MEMS-element lithographic defect recognition using ASDD: a – full surface of the element. Structures of MEMS-element are indicated with green, red line connects positions of recognized lithographic defects. Defects not recognized by the operator of semiconductor manufacturing in manual mode are indicated with orange. b – cutout of the lithographic defect inside structure as an example of recognition with ASDD and not defined by the operator because of low optical contrast.

фактов. Стоит обратить внимание на то, что АСДД генерирует достаточно большое количество данных в процессе нахождения дефектов.

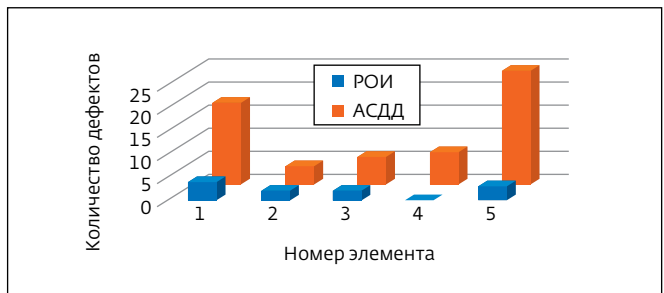


Рис.3. Диаграмма количества дефектов литографии, обнаруженных оператором во время проведения РОИ и при помощи АСДД

Fig.3. Diagram of the number of defects of lithography detected by operator by MOI and by ASDD

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Внедрение в производственный процесс представленной в статье автоматизированной системы детектирования дефектов позволило повысить вероятность обнаружения дефектов литографии в несколько раз по сравнению с ручной оптической инспекцией, выполняемой операторами полупроводникового производства после этапа оптической литографии. Способность программного обеспечения к автоматической классификации дефектов позволила создать базу данных дефектов литографии, которые распознаются системой и классифицируются по восьми основным признакам. Таким образом, подобная система обнаружения дефектов литографии позволяет не пропустить элемент с критическим дефектом на следующий технологический этап и переработать

standard deviation and weight are calculated. Then the neural network classifies the objects found according to the principle of finding the maximum proximity of the characteristics of the current object with the characteristics of the objects in the database by comparing the type of "each to each". At the same time, the following pairs are stored in the object database: key (object type) - value (characteristics).

### MAIN RESULTS OF ASDD OPERATION

Fig.1. presents the images of lithographic defects obtained with ASOI (left) and detected by the above mentioned software (right). A round 100

micrometers hole developed in the photosensitive photoresist contains a defect inside: in the upper image, the defect does not touch the borders of the hole, and on the lower one it does. In the central image the defect is located outside of the structure in the photoresist.

Special software analyses the image received from optical microscope and identifies objects, afterwards it classifies these objects according to the above mentioned algorithm and construct a network consisting of triangles where defects are placed in the vertexes of triangles (Fig.2a). A name of each type of defects is given in accordance with

the previously prepared classification described in paper [3]. Such triangulation allows to visualize locations of defects even if they are so small that the combined image of all surface of the element does not permit to view a defect on it by sight (see an example of a small defect in Fig.2 b).

### COMPARISON OF ASDD AND MOI

Comparison of two systems of defects inspection - ASDD and MOI - shows that use of ASDD allows to identify a greater number of defects than MOI. Fig.3. shows diagram of detected lithographic defects for five different elements. When a span diagram has been plotted, the median of MOI is

# МЕЖДУНАРОДНЫЙ ВОЕННО- МОРСКОЙ САЛОН



# INTERNATIONAL MARITIME DEFENCE SHOW

*“Через сотрудничество – к миру и прогрессу!”*

Организатор:



При участии:



РОСОБОРОНЭКСПОРТ

Устроитель:



ООО  
«Морской Салон»



# IMDS 2019

26-30 июня

РОССИЯ

Санкт-Петербург

- ЭКСПОЗИЦИЯ ОБРАЗЦОВ ПРОДУКЦИИ ПРЕДПРИЯТИЙ
- ДЕМОНСТРАЦИЯ ВООРУЖЕНИЯ И ТЕХНИКИ
- КОНФЕРЕНЦИИ, СЕМИНАРЫ, КРУГЛЫЕ СТОЛЫ, ПРЕЗЕНТАЦИИ
- VIP-ПЕРЕГОВОРЫ
- ПОСЕЩЕНИЕ ПРЕДПРИЯТИЙ

[www.navalshow.ru](http://www.navalshow.ru)

Таблица 1. Сравнение ручной оптической инспекции и АСДД  
Table 1. Comparison of manual optical inspection and ASDD

Критерии	Ручная оптическая инспекция	АСДД
Отсутствие влияния человеческого фактора	–	✓
Количество найденных дефектов	22%*	100%
Автоматическая классификация дефектов	–	✓
Отсутствие необходимости проверки результатов инженером в ручном режиме	–	✓
Отсутствие дополнительных измерений межпроцессного контроля	–	✓
Временной фактор	✓	✓
Объем данных	✓	–

\* Число получено как медиана в диаграмме размаха из пяти исследований (box-and-whiskers plot).

его без значительных потерь, что приводит к сокращению производственного брака на финальных этапах производства изделия и, как следствие, к уменьшению издержек производства. Более того, классификация дефектов позволяет выявить отклонения в технологических процессах и своевременно принять

эффективные меры к их устранению, что существенно сокращает время простоя производственной линии.

#### ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

1. **Bruning J.H.** Optical Lithography: 40 years and holding // Proc. SPIE. 2007. Vol. 6520. P. 652004.
2. **Levinson H. J.** Principles of Lithography // 3<sup>rd</sup> edition. SPIE Press, 2010. 506 p.
3. **Заблоцкая 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.
4. ООО "АКСАЛИТ Софт" Нейронная сеть в программном обеспечении АХАЛИТ // URL: <https://axalit.ru/articles/neuronnaya-set-v-programmnom-obespechenii-axalit> (дата обращения 01.07.2018).
5. **Kazmiruk V.V., Varabanenkov M.Yu.** Optimization of e-beam Systems for Wafer Defect Inspection and for Die-to-Database Verification // ESC Transactions. 2009. V. 23. Is.1. PP. 43–52.
6. **Francis H.Y. Chan F.K. Lam,** and Hui Zhu Adaptive thresholding by variational method // IEEE Transactions on Image Processing 7, 3 (March) 1998, 468–473.
7. **Gonzales R.C., Woods R.E.** Digital image processing // Boston, MA Addison-Wesley, 2001. 823 p.
8. **Suzuki S. and Abe K.** Topological Structural Analysis of Digitized Binary Images by Border Following // CVGIP 30 1, 1985, pp 32–46.

equal to 22% (in relation to quantity of defects detected by ASDD). This difference in defects detection is due to a human factor. Besides, when MOI is completed it is necessary to make an additional classification of defects by types in a manual mode. ASDD allows to exclude a human factor when detecting defects, and automatically classified them according to relevant database of defects. Moreover, ASDD makes it possible to combine inspection of defects with interprocess monitoring of the process. As a result, it leads to minimization of a number of manipulations on a wafer. Tests have proved that the times spent on AASDD and MOI are,

approximately, equal. Table 2 demonstrates full comparison of MOI and ASDD on a base of above mentioned facts. It was shown that ASDD generates quite a large data during the process of defects detection.

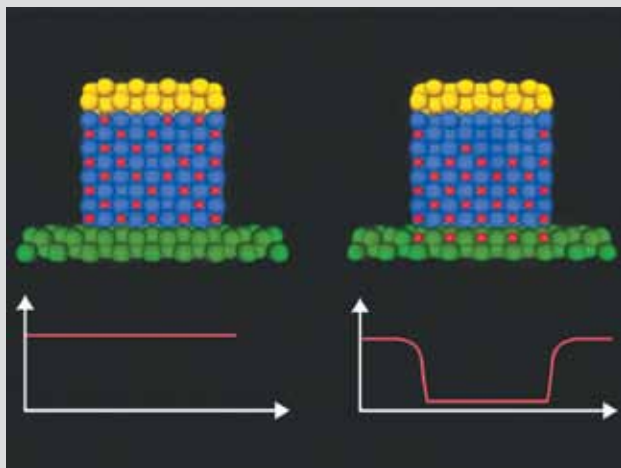
#### CONCLUSIONS

Implementation of the ASDD into the production process has made it possible to improve probability of detecting lithographic defects several times as compared with the MOI performed by semiconductor manufacture operators after the optical lithography stage. Ability of the software to automatically classify defects made it possible to create a database

of lithographic defects that are recognized by the system and are classified according to eight main features. Thus, such a system for detecting defects in lithography allows not to let an element with a critical defect to the next technological stage and to rework it without significant losses, which leads to reduction of rejects at the final production stages and, consequently, to reduce production costs. Moreover, the classification of defects makes it possible to identify deviations in the technological processes and promptly take effective measures to eliminate them, which significantly reduces production line downtime. ■



## СПИНТРОНИКА ЕЩЕ НА ШАГ ПРИБЛИЗИЛАСЬ К НОВОЙ ЦИФРОВОЙ ЛОГИКЕ



Ионы водорода управляют спинами электронов, открывая новые перспективы в цифровой логике.

Спиновая электроника настолько прочно вошла в научную практику, что сложности на пути ее внедрения забылись. В отличие от обычных транзисторов, спинтроника оперирует с квантовыми свойствами электронов. Свойство электронов сохранять спины – основа магнетизма: если спины электронов

сонаправлены, это магнетик. Ранее разработчики транзисторов прикладывали внешнее электрическое напряжение для изменения ориентации спинов, но эффект оказался ничтожно малым. Магнетики имеют толщину порядка нескольких атомов, и накопление заряда изменяет электронную структуру у границы магнетик – диэлектрик. Изменения магнитных свойств составляет лишь 1%. Недавно использовались ионы кислорода для изменения магнитных свойств, но их размер деформирует магнетик и делает устройство недееспособным. Исследователи Массачусетского технологического института решили проблему, используя ионы водорода. Теперь переключать спины электронов можно полностью. Обнаружено, что использование ионов водорода не приводит к деградации материала. "Перемещая ионы, мы существенно меняем характер связей в нем и его соединения с соседним материалом", – объясняет Джеффри Бич, профессор МТИ. Простой замены ионов мало, необходимы материалы, способные легко пропускать протоны и интегрироваться с магнетиком. Устройство собирает протоны, перемещает их в твердый материал и обратно и этим контролирует магнитные свойства. "Мы сделали большой шаг, но для магнитной памяти потребуется более высокая скорость переключения. Потребуется быстрые протонные проводники. При нейроморфной обработке данных скорость переключения не критична, нужно создать новую архитектуру для новых возможностей".

По материалам <https://spectrum.ieee.org>

6–8 ДЕКАБРЯ, MARRIOTT KRASNAYA POLYANA & СОЧИ КАЗИНО И КУРОРТ



ПРЕМИЯ В ОБЛАСТИ ИННОВАЦИЙ

**«ВРЕМЯ ИННОВАЦИЙ — 2018»**

[www.novpro.org](http://www.novpro.org)

Информационные партнеры:

