



# МЕТОДИКА УДАЛЕНИЯ КРЕМНИЕВЫХ ПОВЕРХНОСТНЫХ МИКРОДЕФЕКТОВ ЛАЗЕРНОЙ АБЛЯЦИЕЙ

## METHOD FOR REMOVAL OF SILICON SURFACE MICRODEFECTS BY LASER ABLATION

А.Быкова<sup>1,2</sup>, студентка, (ORCID: 0000-0002-9927-9974), И.Род<sup>1</sup>, к.ф.-м.н., директор по производству ООО "МАППЕР", (ORCID: 0000-0003-2793-739X), К.Битаров<sup>1</sup>, студент, (ORCID: 0000-0002-7777-3525), А.Казачков<sup>1</sup>, IT-менеджер, (ORCID: 0000-0002-5160-1207), Я.Минаева<sup>1</sup>, инженер-метролог, (ORCID: 0000-0002-2099-8096), К.Ракетов<sup>1,2</sup>, аспирант, IT-инженер, (ORCID: 0000-0003-1108-2235), В.Трушин<sup>1</sup>, инженер, (ORCID: 0000-0003-1910-4531), А.Фролова<sup>1</sup>, инженер, (ORCID: 0000-0003-3157-9812), Д.Подгорный<sup>2</sup>, к.ф.-м.н., доцент, (ORCID: 0000-0002-8237-0608), Д.Шамирян<sup>1</sup>, PhD, генеральный директор ООО "МАППЕР", (ORCID: 0000-0003-2017-4836) / irina.rod@mapperrllc.ru

A.Bykova<sup>1,2</sup>, student, I.Rod<sup>1</sup>, Cand. of Sci. (Physics and Mathematics), Manufacturing Director, K.Bitarov<sup>1</sup>, student, A.Kazachkov<sup>1</sup>, IT-manager, Y.Minayeva<sup>1</sup>, Metrology engineer, K.Raketov<sup>1,2</sup>, Post-graduate, IT-Engineer, V.Trushin<sup>1</sup>, Engineer, A.Frolova<sup>1</sup>, Engineer, D.Podgornyy<sup>2</sup>, Cand. of Sci. (Physics and Mathematics), D.Shamiryani<sup>1</sup>, PhD, General Director

DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.6.342.349

Получено: 10.08.2021 г.

Одним из ограничивающих факторов непрерывного повышения доли выхода годных микро-размерных изделий на МЭМС-производствах является ненулевой средний уровень плотности загрязнений производственных инфраструктур. Этот фактор влияет на появление поверхностных дефектов в конечных изделиях, которые, в свою очередь, могут нарушать функциональность сенсора, датчика. Настоящая работа предлагает метод постобработки готовых чувствительных элементов по удалению кремниевых дефектов без нарушения целостности изделия для перевода бракованного изделия в класс годных. Апробация предложенного метода на МЭМС-производстве ООО "МАППЕР" показала, что результативность метода удаления дефектов методом прецизионного лазерного испарения материала достигает 77% для партии обработанных элементов. Показатель результативности может быть увеличен за счет дальнейшей автоматизации процессов.

One of the limiting factors for continuous yield improvement of micro-sized products at MEMS production lines is a non-zero average level of contamination of the production facilities. This factor impacts appearance of surface defects in the finished goods, which, in turn, can disrupt the functionality of detectors and sensors. This paper proposes a method of post-processing of the manufactured sensitive elements by evaporating silicon defects without violating the integrity of the products in order to transfer the defective products to the category of good ones. Approbation of the proposed method at MEMS production of Mapper LLC showed that the effectiveness of removal of defects by the precise laser evaporation method is up to 77% for a batch of processed elements. Moreover, this performance indicator can be increased through further process automation.

### ВВЕДЕНИЕ

Начиная с марта 2020 года производства, работающие в области микроэлектроники,

столкнулись с резкой нехваткой расходных материалов для работы в условиях чистых помещений с жестким контролем уровня загрязнений.

<sup>1</sup> ООО "МАППЕР", Москва, Россия / "Mapper" LLC, Moscow, Russia.

<sup>2</sup> НИТУ "МИСИС", Москва, Россия / NUST "MISIS", Moscow, Russia.



Поставки одноразовых перчаток, масок, бахил, салфеток и прочего задерживались на неопределенный срок в связи с увеличением объемов поставки данной продукции для медицинских организаций и в целях обеспечения защитными средствами общества в наступивший период распространения новой коронавирусной инфекции. Сокращение объемов поставок и нарушение их графика привели к тому, что промышленные предприятия были вынуждены в срочном порядке перейти на альтернативные непроверенные расходные материалы, либо отказаться от использования некоторых из них, например одноразовых масок, а это в свою очередь вызвало увеличение уровня загрязнения (количества частиц в воздухе на единицу объема) на производствах. Уровень загрязнений на производствах микроэлектроники, как известно, оказывает прямое влияние на количество дефектов в конечных изделиях, на долю бракованной продукции [1]. В сложившейся ситуации стал актуальным поиск новых эффективных методик борьбы с дефектами с целью увеличения выхода годных изделий на производстве.

В настоящей статье авторы предлагают разработанную методику быстрого обнаружения поверхностных кремниевых дефектов на чувствительных МЭМС-элементах и их удаления методом лазерного испарения (абляции). Применение предложенной методики для чипов микроэлектромеханических систем (МЭМС-чипов) на производстве позволила увеличить выход годной продукции на 7%.

### ОБНАРУЖЕНИЕ ПОВЕРХНОСТНЫХ ДЕФЕКТОВ

Ранее в статьях [2] и [3] были представлены общие принципы автоматизированного поиска дефектов на поверхности МЭМС-изделия. Ключевыми процессами для обнаружения дефектов являются автоматизированная оптическая инспекция поверхности

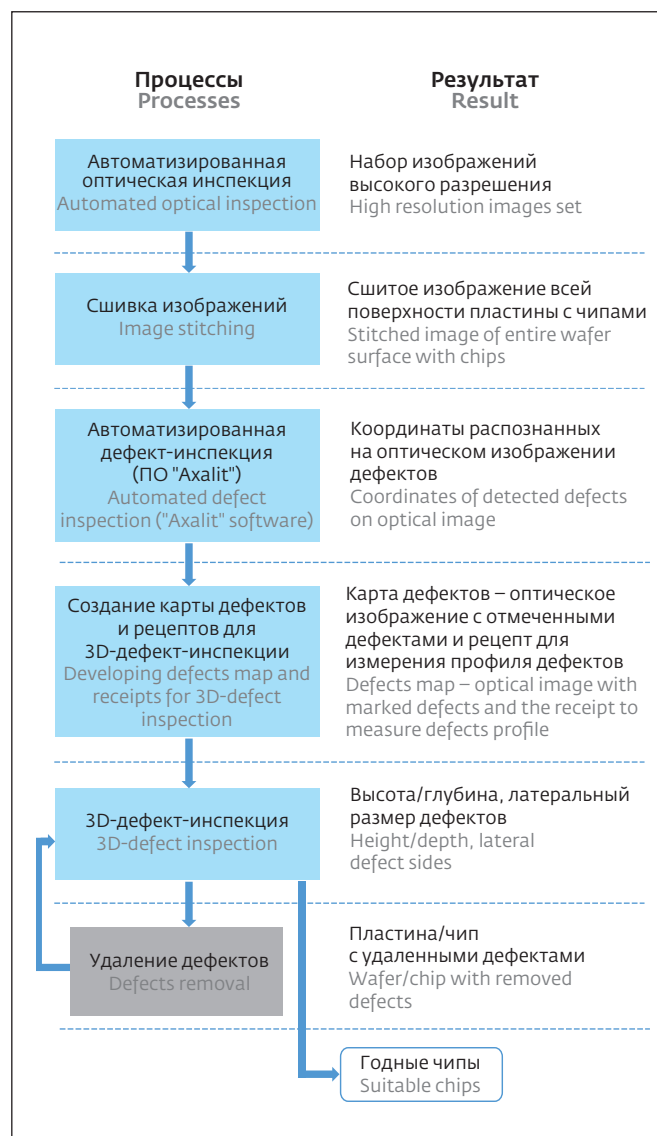


Рис.1. Схема процессов методики обнаружения и удаления поверхностных дефектов на МЭМС-элементе (пластины/чипа)  
Fig.1. Process flow diagram of the technique for detecting and removing surface defects on a MEMS element (wafer/chip)

### INTRODUCTION

Since March, 2020, the manufacturers working in microelectronics have faced a rapid shortage of consumables for operating in clean rooms with a strong contamination level control. Deliveries of disposable gloves, masks, protective overshoes, wipes and other things were delayed indefinitely due

to an increase in the supply of these products to medical organizations and in order to provide protective means for the society in the period of spread of the new coronavirus infection. Shortage of supply and violation of their delivery schedule forced the industrial enterprises to urgently switch over to alternative unverified consumables,

or refuse to use some of them, for example, disposable masks, and this, in turn, caused higher level of contamination concentration (the number of particles in air per volume unit) at the production facilities. It is well known that an average contamination level in microelectronic production impacts directly the number of defects in the

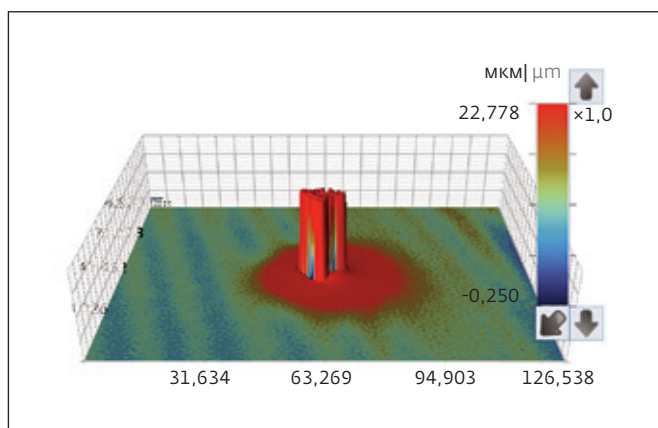


Рис.2. 3D-профиль типичного поверхностного дефекта в виде столбика кремния

Fig.2. 3D profile of a typical silicon pillar surface defect

пластины и/или элемента, позволяющая получать изображения достаточно высокого разрешения, и быстрая машинная обработка полученных изображений. В настоящее время наилучшими методиками обработки изображений с целью поиска дефектов в них являются те, что основаны на работе нейронных сетей [4]. Основным преимуществом подобных программ является их самообучаемость, правда, для их эффективной работы необходимо обучить систему на большом количестве данных. Для действующего производства набрать большое количество данных не составляет трудности.

На рис.1 представлены шаги или процессы, которые необходимо провести в рамках предлагаемой

нами методики обнаружения и удаления поверхностных дефектов. После обнаружения дефектов, которому соответствует шаг автоматизированной дефект-инспекции при помощи программного обеспечения (ПО) "Axalit" [2], мы обладаем информацией о месторасположении дефектов на поверхности пластины или элемента в выбранной системе координат. Далее запускается компьютерный код, позволяющий создать, во-первых, карту дефектов, то есть оптическое изображение, на котором отмечены обнаруженные дефекты, а во-вторых, рецепт для автоматизированного измерения дефектов на оптическом профилемере Bruker Contour GT-K.

По разработанной методике 3D-дефект-инспекции проводились измерения параметров дефектов на оборудовании Bruker ContourGT-K с моторизованным столиком и турелью при использовании интерференционного объектива типа Миро с увеличением 50х. Погрешность определения координат дефектов в заданной системе координат по нашим оценкам не превышает 3 мкм и достаточна для последующего автоматического позиционирования объектива с полем зрения размером 126×95 мкм с целью локализации дефекта. Пример изображения 3D-дефекта-инспекции приведен на рис.2. Автоматизация дефект-инспекции позволила значительно уменьшить время ее проведения: ручная дефект-инспекция 100-мм пластины может быть проведена за 13-50 мин в зависимости от количества дефектов на пластине, тогда как автоматизированная дефект-инспекция в среднем занимает 4 мин на пластину, содержащую десятки и даже сотни чипов.

finished products and the ratio of defective products [1]. Under these conditions, the search for new effective methods to eliminate defects in order to increase the yield of usable products is very important.

In this paper, we proposed the developed method for rapid detection of the silicon surface defects on sensitive MEMS-elements and their removal by laser ablation (evaporation). Applying of this methodology for MEMS chips in production makes it possible to increase the yield of usable products by 7%.

## DETECTION OF SURFACE DEFECTS

Earlier, the general principles of automated surface defect inspection in MEMS elements were presented [2, 3]. The main processes to detect defects are the automated optical inspection of the surface of a wafer and/or element, which allows of obtaining high-resolution images, and fast machinery processing of the received images.

Nowadays, the best methods of image processing to determine defects are based on neural network operation [4].

The main advantage of such software is their self-learning ability, however, for their correct work it is necessary to train this software using a large amount of data. For the existing industry it makes no difficulty to collect the required amount of data.

Figure 1 demonstrates the steps and processes necessary for detecting and removing defects according to the proposed methodology. After detecting defects, which is the step of an automated defect-inspection realized by the software "Axalit" [2], we get

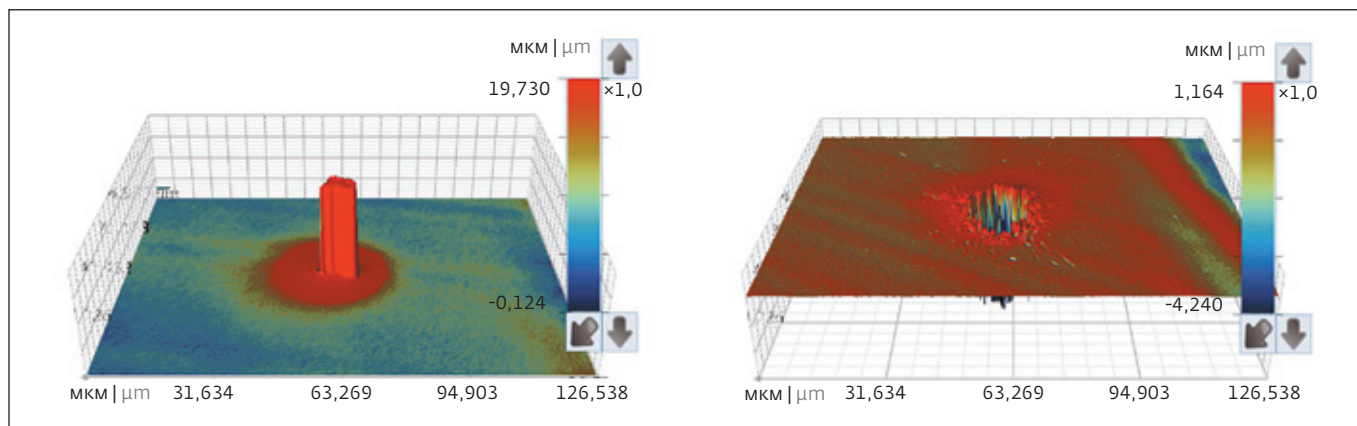


Рис.3. Вид столбчатого дефекта до (слева) и после (справа) обработки лазером  
 Fig.3. View of columnar defect before (left) and after (right) laser treatment

Как можно заметить, высота дефекта на рис.2 достигает 22,7 мкм и визуально форма дефекта напоминает столбик. Как было установлено, такие дефекты являются критичными для конечного продукта именно из-за достаточно большого показателя высоты. Любой МЭМС-сенсор имеет так называемые запрещенные зоны – зоны, в которых дефект определенных размеров является критичным (killer defect), так как приводит к нарушению функциональности сенсора, причем, запрещенной зоной может быть как вся поверхность элемента, так и определенные области на нем, в зависимости от требований. Элемент или чип, имеющий дефект в запрещенной зоне, считается бракованным. Количество брака в производстве непосредственно влияет на экономическую

выгоду изготовления продукции, в связи с этим уменьшение количества брака за счет сокращения дефектов в изделиях является одной из основных производственных задач.

#### ВЫЖИГАНИЕ ПОВЕРХНОСТНЫХ ДЕФЕКТОВ

Одним из методов сокращения дефектов типа столбик является прецизионное выжигание кремниевых столбиков при помощи лазерного излучения. Прецизионным данный способ является в силу того, что обработке подвергается не вся подложка, а лишь сам дефект. Более того, это единственный метод, который воздействует не на целую пластину, а на единичный микросенсор, выделенный из пластины, что значительно снижает конечное

information about the location of surface micro-defects on the inspected wafer or element in the given coordinate system. Afterwards the computer code is run, which makes it possible to create, first, a defect map, i.e. an optical image on which the detected defects are marked, and secondly, a machine recipe for automated measurement of defects with a Bruker Contour GT-K optical profilometer.

According to the developed defect inspection methodology, the measurement of the defect sizes is performed using a Mirau interferometer objective

with magnification of 50<sup>x</sup> and Bruker ContourGT-K equipment with motor-operated table and a turret head. According to our estimations, the error of defect coordinates detection in a given coordinate system does not exceed 3 μm which is sufficient for the subsequent automated positioning of the objective with a field of view of 126 × 95 μm and for defect localization.

The example of an 3D-defect inspection image is shown in Fig.2.

Automation of the defect inspection has significantly

reduced its time: the manual defect inspection of a 100 mm wafer can be done in 13–50 minutes, depending on the number of defects on a wafer, whereas the automated defect inspection takes in average 4 minutes per wafer containing dozens or even hundreds of chips. As it was established, the height of the defect in Fig.2 reaches 22.7 μm, and visually the defect shape resembles a pillar. Such defects have been found to be critical to the final product just because of the rather large height index. Any MEMS sensor has so-called forbidden

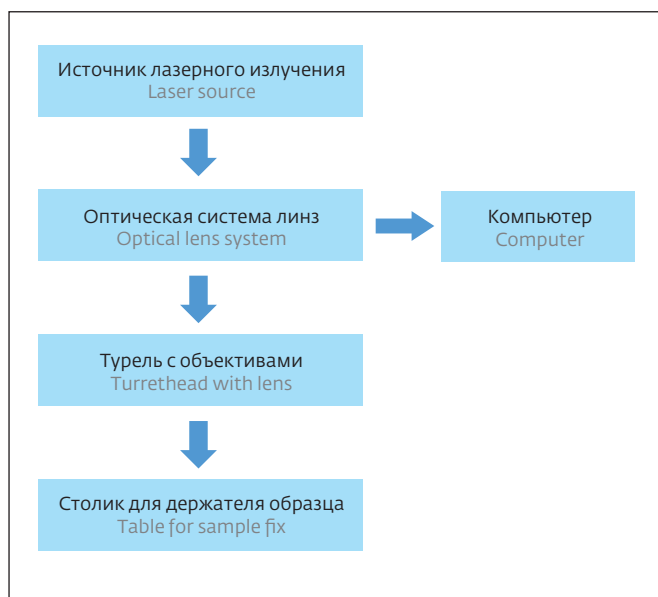


Рис.4. Блок-схема установки лазерной обработки дефектов  
Fig.4. Block diagram of a laser defect treatment plant

количество бракованных элементов. Таким образом, в случае неудачной обработки будет испорчен лишь один сенсор, а не целая пластина, как, например, это может произойти при жидкостном травлении.

Процесс достаточно прост в осуществлении: держатель с чипом помещается под так называемую лазерную пушку. При помощи оптического микроскопа, встроенного в установку, оператор наводит луч лазера точно в точку, где находится дефект. Прицеливаясь,

оператор "выстреливает" по дефекту, начиная с обработки краевых областей к центру с целью не перекрыть кремниевой крошкой ту область, которая еще не обработана. Как правило, один выстрел способен удалить до 5 мкм кремния вглубь. Однако, установка также включает в себя функцию обработки на 10 мкм по глубине. Установка также включает в себя функцию обработки на 10 мкм по глубине, если это необходимо. После обработки дефектная область выглядит наподобие кратера с выступающими краями. 3D-профиль дефектов до и после обработки лазером представлен на рис.3.

В результате шести выстрелов по дефектной зоне удалось снизить высоту дефекта с 20 мкм до менее чем 2 мкм (рис.3). Блок-схема установки для лазерного выжигания представлена на рис.4.

Установка обеспечивает удаление дискретных масс с кремниевых сенсоров за счет термического испарения кремния с помощью лазера. Обработанная область остается в виде лунки диаметром не более 15 мкм. Точность позиционирования стола для установки образцов находится в диапазоне 5 мкм. Устройство фокусировки строится на основе аналитического микроскопа и имеет дополнительный телевизионный канал наблюдения и наведения. Импульсный лазер с длиной волны 0,53 мкм позволяет получать пятна в зоне обработки от 5 до 20 мкм. Мощность лазерного излучения находится в диапазоне от 0,1 до 0,3 Вт при постоянной частоте 10 Гц. На рис.5 представлены случаи наиболее характерных типов обработки, которая позволила удалить дефект полностью или частично, и в первом случае перевести

zones – the zones wherein a defect of certain dimensions is critical (killer defect), since it leads to malfunctioning of the sensor, and the forbidden zone can be the entire surface of the element, as well as certain areas on it, depending on the requirements. An element or chip that has a defect in the forbidden zone is considered to be defective. The number of defective products has a direct impact on the economic benefit of manufacturing, so reducing the number defective products by reducing defects in products is one of the main production objectives.

### LASER ABLATION OF SURFACE DEFECTS

One method of reducing pillar-type defects is high precision ablation of silicon pillars using laser irradiation. This method is precise because it is not the entire substrate that is treated, but only the defect itself. Moreover, it is the only method that affects not the whole wafer, but a single micro-sensor separated from the wafer, which significantly reduces the final number of defective elements. In this way, in case of bad processing, only one sensor will be damaged and not

the entire wafer, as can happen with wet etching, for example.

The process is quite simple: the holder with the chip is placed under a so-called laser gun. Using the optical microscope built into the machine, the operator points the laser beam precisely at the point where the defect is. By aiming, the operator "shoots" at the defect, starting from the edge areas towards the centre in order not to overlap the silicon crumbles in the area that has not yet been processed. As a rule, one shot is capable of removing up to

элемент в класс годных. Слева представлены профили дефектов до обработки, а справа – профиль обработанной области.

На рис.5а и b изображен дефект, обработка которого была проведена успешно. Как можно видеть, высота дефекта стала менее 2 мкм, а глубина лунки не превысила 10 мкм (такая глубина является критичной согласно требованиям к представляемому сенсору). На рис.5с представлен высокий столбчатый дефект, а на рис.5d – профиль обработанной его области, где глубина лунки составила более 10 мкм, что привело к браку продукции. Также может возникнуть трудность с обработкой слишком высоких дефектов, когда выжигания лазером недостаточно, чтобы полностью убрать высоту дефективного столбика, что также не приведет к переводу элемента в разряд годных (рис.5е и f). Кроме того, может возникнуть проблема с тем, чтобы данным лазерным пучком полностью обработать зону с дефектом, в случае, если изначально критический размер слишком большой. Так, например, на рис.5g представлен широкий дефект высотой более 20 мкм (до удаления). Видно, что обработать удалось лишь часть дефектной области, в то время как другая часть дефекта почти не изменила высоты. Связано это с тем, что выжигание поверхностных дефектов производит оператор, руководствуясь визуальным методом, что иногда не может гарантировать получения точных результатов.

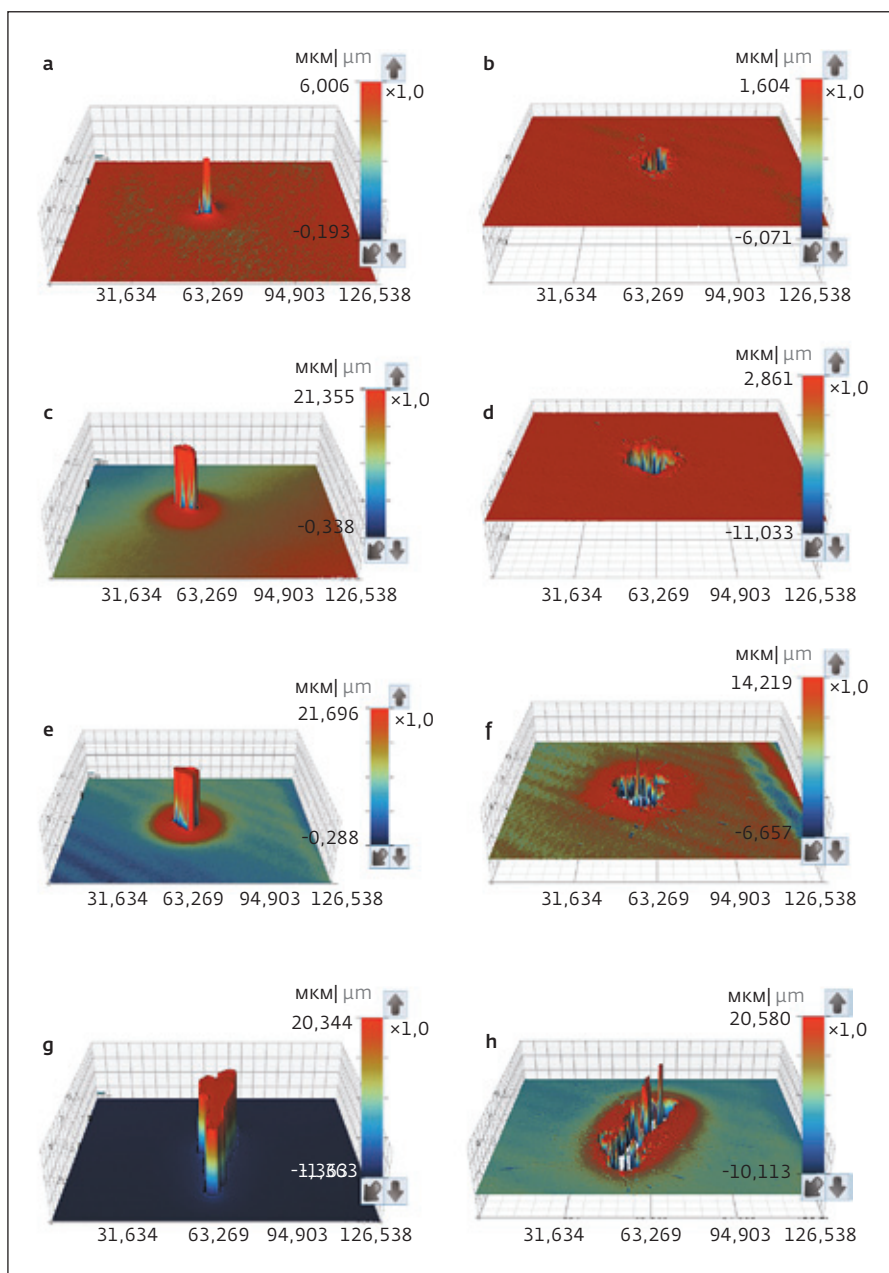


Рис.5. Изучение профиля дефектов до (слева) и после (справа) обработки прецизионным лазерным пучком соответственно

Fig.5. Examination of the defect profile before (left) and after (right) high precision laser beam treatment respectively

### РЕЗУЛЬТАТИВНОСТЬ МЕТОДИКИ УДАЛЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ ДЕФЕКТОВ

Описанный выше метод показал себя результативным как с производственной, так и с экономической точек зрения – выход годной продукции был увеличен приблизительно на 7% в производстве трех партий чипов, каждая из которых состояла из 120 чипов. На рис.6 представлена гистограмма роста выхода годных элементов в зависимости от проведенных обработок в отдельных партиях. Как можно видеть,

за четыре обработки 45–77% обрабатываемых (дефектных) чипов были переведены из категории брака в категорию годных.

### ВЫВОДЫ

Предложенная в статье методика борьбы с поверхностными дефектами МЭМС-элементов была успешно апробирована на МЭМС-производстве ООО "МАППЕР". Результативность метода удаления

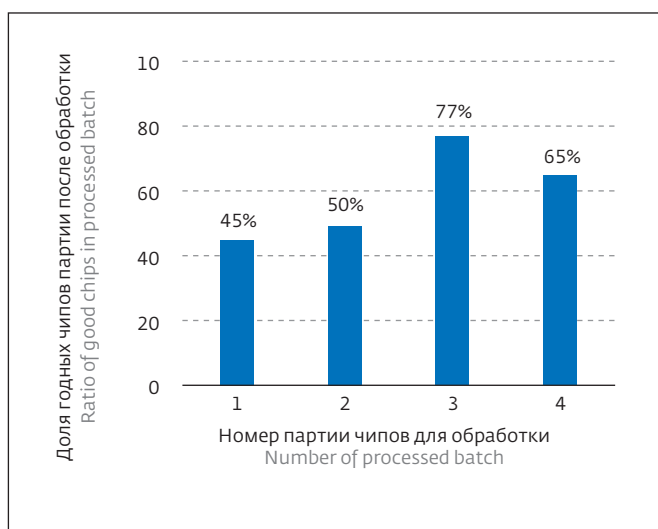


Рис.6. Процент элементов, переведенных из категории брака в категорию годных при помощи лазерного испарения дефектов для нескольких обработанных партий

Fig.6. Percentage of elements converted from defective to good ones by laser evaporation of defects for the several processed batches

дефектов методом прецизионного лазерного испарения материала достигает 77% для партии обработанных элементов. Показатель результативности может быть увеличен за счет автоматизации процесса удаления дефектов, которая может быть достигнута посредством следующих изменений в системе лазерной обработки: моторизации столика, улучшения точности его позиционирования,

автоматизации позиционирования источника лазерного излучения, добавления возможности настройки размера лазерного луча и его мощности.

**Декларация о конфликте интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликтов интересов или личных отношений, которые могли бы повлиять на работу, представленную в данной статье.

#### ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

1. Microchip Fabrication: A Practical Guide to Semiconductor Processing. Peter van Zant. 2004, McGraw-Hill Book Company, 544 p.
2. **Ракетов К., Израилев Н., Казачков А., Заблоцкая Е., Род И., Рябков М., Исаченко А., Шамирян Д.** Об автоматизированной системе детектирования дефектов на МЭМС-производстве // НАНО-ИНДУСТРИЯ. 2018. № 7–8. С. 542–548.
3. **Заблоцкая Е., Род И., Таренкин А., Казачков А., Шамирян Д.** Автоматизированная инспекция дефектов литографии как метод контроля качества МЭМС-элементов // Нано- и микросистемная техника. 2017. № 10. С. 605–613.
4. **Jong-Chih C., Ming-Tao W., Jiann-Der L.** Inspection and Classification of Semiconductor Wafer Surface Defects Using CNN Deep Learning Networks. Applied Sciences. 2020. № 15. P. 13.

5  $\mu\text{m}$  of silicon to depth, but this can sometimes vary. The unit also includes a 10  $\mu\text{m}$  depth treatment if required. After treatment the defect area looks like a crater with protruding edges. A 3D defect profile before and after laser treatment is shown in Fig.3.

As a result of six shots on the defective area, the defect height was reduced from 20  $\mu\text{m}$  to less than 2  $\mu\text{m}$  (Fig.3). A block diagram of the laser ablation setup is shown in Fig.4.

The unit removes discrete masses from the silicon sensor by thermal evaporation of the

silicon using a laser. The treated area remains in the form of a hole of a diameter no more than 15  $\mu\text{m}$ . The stage positioning error is stand in the range of 5  $\mu\text{m}$ . The focusing device is based on an analytical microscope and has an additional television channel for observation and guidance. An impulse laser with a wavelength of 0.53  $\mu\text{m}$  produces spots in the treatment area between 5  $\mu\text{m}$  and 20  $\mu\text{m}$ . The laser power varies from 0.1W to 0.3W at a constant frequency of 10 Hz. Figure 5 shows the cases of the most characteristic types of treatment that have removed the defect

wholly or partially, and, in the first case, upgraded the element to a good product. On the left there are the defect profiles before treatment, and on the right - the treated area profile.

Figures 5a and 5b show a defect that has been successfully treated. As can be seen, the height of the defect became less than 2  $\mu\text{m}$  and the depth of the hole did not exceed 10  $\mu\text{m}$  (this depth is critical according to the requirements to the given sensor). Figure 5c shows the high pillar defect and Fig.5d shows a profile of its treated area, where the depth of the indentation was

more than 10  $\mu\text{m}$ , resulting in defective products. It may also be difficult to treat defects that are too high, when laser power is not sufficient to completely remove the height of the defect column, which will not make the element fit (Fig.5e and Fig.5f). It can also be a problem to completely treat the defect area with this laser beam, if the original critical size is too large. For example, Fig.5g shows a wide defect with a height of more than 20  $\mu\text{m}$  (before removal). It can be seen that only a part of the defect area has been treated, while the other part of the defect has hardly changed in height. This is due to the fact that the laser ablation is performed by the operator's decision based on a visual information, that sometimes cannot guarantee accurate results.

### PRODUCTIVITY OF SURFACE DEFECTS REMOVING METHOD

The method described above proved to be effective both from the production and economic points of view – the yield of good products was increased by about 7% in the production of three batches of chips, each batch consisting of 120 chips. Fig.6 shows a histogram of the increase in the yield of good elements as a function of the carried out treatments in the individual batches. As can be seen, in 4 treatments 45–77% of the processed (defective) chips were transferred from the category of discarded to the category of good chips.

### CONCLUSIONS

The proposed above method for elimination of surface defects in MEMS elements has been

successfully tested at the MEMS produced by Mapper LLC. The effectiveness of the method of defect removal by precision laser evaporation of material reaches 77% for a batch of treated elements. The efficiency can be increased by automating the defect removal process which can be achieved by the following changes in the laser processing system: motorization of the stage, improvement of its positioning accuracy, automation of positioning of the laser beam source and adding a possibility of adjusting the size of the laser beam and its power. ■

**Declaration of Competing Interest.** The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.



## ИЗДАТЕЛЬСТВО «ТЕХНОСФЕРА» ПРЕДСТАВЛЯЕТ КНИГУ:



Юрген Бёккер  
СПЕКТРОСКОПИЯ

Москва: ТЕХНОСФЕРА, 2021. – 528 с., ISBN 978-5-94836-220-5

Цена 760 руб.

Спектроскопия как средство описания атомов, ионов и молекул с помощью типовых длин волн, измеряемых при возбуждении, принадлежит сегодня к важнейшим и самым распространенным методам инструментальной аналитики. Специальные измерительные устройства, в том числе абсорбционные и эмиссионные спектрометры, обеспечивают точное определение количественного и качественного состава газообразных, жидких и твердых веществ.

В книге дается обзор разных методов атомной и молекулярной спектрометрии и рассматриваются многие аналитические проблемы, решаемые в лабораториях промышленных предприятий, в естественнонаучных и технических учреждениях, а также проблемы изучения и защиты объектов окружающей среды. В книге представлена широкая гамма существующих методов исследования, а также перечень приборов с руководством по их применению.

### КАК ЗАКАЗАТЬ НАШИ КНИГИ?

125319, Москва, а/я 91; тел.: +7 495 234-0110; факс: +7 495 956-3346; e-mail: knigi@technosphere.ru; sales@technosphere.ru