

# ТРИБОМЕТРИЧЕСКОЕ УСТРОЙСТВО ЭКСПРЕСС-КОНТРОЛЯ ЧИСТОТЫ ПОВЕРХНОСТИ ПОДЛОЖЕК

Н.А. Ивлиев<sup>1,2</sup>, В.А. Колпаков<sup>1</sup>, Д.С. Лукичев<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Самарский государственный аэрокосмический университет им. академика С.П. Королева (национальный исследовательский университет), Самара, Россия

<sup>2</sup> Институт систем обработки изображений РАН, Самара, Россия

Представлено трибометрическое устройство, предназначенное для экспресс-контроля концентрации органических загрязнений на поверхности полупроводниковых и диэлектрических подложек в диапазоне  $5 \cdot 10^{-10}$ – $10^{-7}$  г/см<sup>2</sup> и основанное на измерении коэффициентов трения покоя и скольжения между исследуемыми поверхностями.

**Ключевые слова:** трибометрическое устройство, контроль степени чистоты, поверхность.

## Введение

Контроль степени чистоты поверхности полупроводниковых и диэлектрических подложек широко используется в микро-, нанoeлектронике [1-3], дифракционной оптике [4, 5] и нанofотонике [6], т.к. адсорбция органических загрязнений приводит к изменению электрофизических параметров поверхности [7, 8], снижению адгезии наносимых технологических слоев [9, 10], увеличению толщины поверхностного оксида при термоокислении [11] и, как следствие, ухудшению рабочих характеристик или выходу из строя производимых элементов.

С ростом площади и скорости обработки подложек проведение указанной операции контроля значительно усложняется в виду ограничения времени, отводимого на измерение чистоты поверхности подложек [1]. Поэтому возникает острая необходимость экспресс-контроля чистоты поверхности.

Большинство существующих методов экспресс-контроля обладают недостатками, затрудняющими их использование в технологическом процессе, например: загрязнение исследуемой поверхности атомами и молекулами веществ используемых при измерении [12, 13], необходимость применения зондов-инденторов с эталонными свойствами поверхностей [14], ограниченность контролируемых типов подложек [1].

Авторы работы [4] предлагают устранить указанные недостатки путем использования в качестве критерия чистоты поверхности коэффициент трения скольжения двух подложек, прошедших идентичную процедуру очистки и располагающихся друг относительно друга под некоторым углом, так что между ними образуется точечный контакт. Движение подложки-зонда, в этом случае, осуществляется под действием силы тяжести, так как исследуемая поверхность располагается под углом к горизонту.

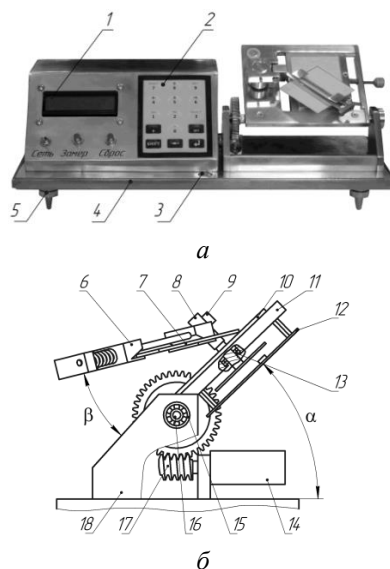
Существенным недостатком данного метода является зависимость коэффициента трения скольжения от угла наклона исследуемой подложкой относительно горизонта, так как с увеличением скорости движения подложки-зонда уменьшается сила адгезии между взаимодействующими поверхностями [15].

Следовательно, чем меньше скорость движения подложки-зонда, тем выше чувствительность трибометрической системы к изменению концентрации загрязнений. Оптимальный угол наклона исследуемой подложки при этом соответствует моменту перехода подложки-зонда из состояния покоя к скольжению.

Поэтому в настоящей работе предлагается с помощью специализированной автоматической системы управления увеличивать наклон исследуемой подложки до момента сдвига подложки-зонда, а концентрацию органических загрязнений вычислять усреднением концентраций, соответствующих коэффициентам трения покоя и скольжения.

## 1. Конструкция и принцип работы устройства контроля

Общий вид устройства контроля, реализующего описанный процесс, представлен на рис. 1а.



**Рис.1.** Общий вид спереди (а) и схематичный вид сбоку (б) устройства контроля: 1 – жидкокристаллический индикатор; 2 – клавиатура; 3 – пузырьковый уровень; 4 – массивная плита; 5 – регулировочная ножка; 6 – подложкодержатель подложки-зонда; 7 – подложка-зонд; 8 – вал подложкодержателя подложки-зонда; 9 – муфта крепежная; 10 – исследуемая подложка; 11 – наклонный столик; 12 – печатная плата с датчиками; 13 – роликовый подшипник; 14 – мотор-редуктор; 15 – шариковый подшипник; 16 – вал поворотного столика; 17 – червячная передача; 18 – станина;  $\alpha$  – угол между исследуемой подложкой и горизонтом;  $\beta$  – угол между подложками.

Конструктивно прибор состоит из двух основных частей: блока электроники, исполненного в отдельном металлическом корпусе, и трибологической системы. Обе части размещены на массивной плите 4, которая выполнена из нержавеющей стали и оснащена пузырьковым уровнем 3, что позволяет с помощью регулировочных ножек 5 обеспечить устойчивость прибора в строго горизонтальном положении.

Трибологическая система, схематичный вид сбоку которой представлен на рис. 1б, представляет собой взаимодействующие подложки, расположенные на наклонном столике 11 (рис. 1б). Исследуемая подложка 10 фиксируется непосредственно на поверхности столика, а подложка-зонд 7 в подложкодержателе 6, который позволяет осуществлять регулировку угла  $\beta$  между подложками. Для организации движения

подложки-зонда по круговой траектории подложкодержатель с помощью муфты 9 соединен с валом 8, который установлен в роликовом подшипнике с малым радиальным зазором 13, что обеспечивает высокую устойчивость вала при радиальных нагрузках. Сила давления в пятне контакта, при такой конструкции, равна суммарному весу подложки-зонда и его подложкодержателя, поэтому с целью снижения механических деформаций поверхностей подложкодержатель выполнен из дюралюминиевого сплава.

Наклон трибометрической системы осуществляет мотор-редуктор 14, который через червячную передачу 17 вращает вал 16, установленный в подшипниках качения 15 на боковых стенках станины 18. Для сопряжения со столиком 11 на теле вала выполнена лыска (фрезерованная поверхность на валу).

На передней панели корпуса блока электроники располагаются кнопки “Замер” и “Сброс”, пленочная клавиатура 2 и жидкокристаллический индикатор 1 (рис. 1а).

При нажатии кнопки “Замер” происходит плавное увеличение угла наклона трибологической системы до момента начала движения подложки-зонда, что фиксируется оптическим датчиком (PAN3101DB), расположенным на печатной плате 12 и следящим за поворотом вала 8 (рис. 1б). Сигнал о движении передается данным датчиком в микроконтроллерную систему, которая останавливает мотор-редуктор и регистрирует значение угла, при котором начинается движение,  $\alpha_{cm}$ , измеренное инклинометром, реализованным на основе акселерометра (LIS302DLH) 12.

Угол  $\alpha_{cm}$  характеризует коэффициент трения покоя, который рассчитывается в соответствии с программным обеспечением микроконтроллера по выражению:

$$f_n = tg\alpha_{cm} . \quad (1)$$

При последующем движении подложки-зонда фиксируется его ускорение, что позволяет найти величину коэффициента трения скольжения  $f_{ск}$  [4]:

$$f_{ск} = tg\alpha_{cm} - \frac{a}{g \cos\alpha} , \quad (2)$$

где  $a$  – ускорение движения подложки-зонда.

Определение величин концентраций загрязнений, соответствующих коэффициентам трения покоя и скольжения, осуществляется по эмпирическим зависимостям, полученным в работах [14, 16]:

$$lg C_n = mlg \frac{f_{макс} - f_n}{f_{макс} - f_{мин}} - B , \quad (3)$$

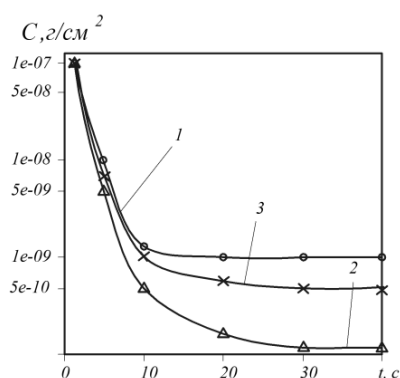
$$C_{ск} = (1 - f_{ск.о}) C_{мин} + C_{макс} f_{ск.о} , \quad (4)$$

где  $C_n$ ,  $C_{ск}$ ,  $г/см^2$  – концентрации атомно-молекулярных загрязнений, соответствующие коэффициентам трения покоя и скольжения;  $m$ ,  $B$  – эмпирические константы;  $f_{макс}$ ,  $f_{мин}$  – максимальный и минимальный коэффициент трения покоя;  $f_{ск.о}$  – коэффициент трения скольжения в относительных величинах;  $C_{мин}$ ,  $C_{макс}$  – предельные значения концентраций атомно-молекулярных загрязнений.

## 2. Результаты эксперимента

Предлагаемое устройство было использовано для контроля чистоты поверхности подложек диоксида кремния размером  $20 \times 30$  мм, прошедших подготовку по методике, описанной в работе [16]. Согласно этой методике степень чистоты поверхности подложек определяется длительностью их облучения плазменным потоком, что позволяет с высокой повторяемостью формировать поверхности с требуемой концентрацией атомно-молекулярных загрязнений.

Трибометрический контроль чистоты таких поверхностей осуществлялся по величинам коэффициентов трения скольжения и покоя, характеризующимся кривыми 1 и 2, представленными на рис. 2. Соответствующие коэффициентам трения значения концентраций загрязнений в  $\text{г/см}^2$  определялись по эмпирическим зависимостям (3) и (4).



**Рис.2.** Экспериментальные зависимости концентрации атомно-молекулярных загрязнений на поверхности диоксида кремния от длительности облучения плазменным потоком: 1, 2 – соответствуют коэффициентам трения скольжения и покоя; 3 – среднее арифметическое значений концентраций на графиках 1 и 2.

График, полученный измерением коэффициентов трения скольжения (1 на рис. 2), показывает достижение предела чувствительности такого метода при длительности очистки  $t \geq 10$  с, который равен  $10^{-9}$   $\text{г/см}^2$ , что хорошо согласуется с результатами, полученными в работе [16].

При измерении коэффициентов трения покоя (рис. 2, кривая 2) предел чувствительности наступает лишь после 30 с облучения и соответствует концентрации загрязнений  $10^{-10}$   $\text{г/см}^2$ , что на порядок ниже значений, соответствующих коэффициенту трения скольжения при такой же длительности облучения. Согласно [5], столь сильное отличие обусловлено эффектом продавливания атомно-молекулярных загрязнений подложкой-зондом.

Вычисление среднего значения концентраций, соответствующих коэффициентам трения покоя и скольжения (рис. 2, кривая 3), позволяет скомпенсировать эффект продавливания атомно-молекулярных загрязнений, сохранив чувствительность, характерную для коэффициента трения покоя.

## Заключение

В настоящей работе представлено трибометрическое устройство, реализующее экспресс-контроль чистоты поверхности подложек по величинам коэффициентов трения покоя и скольжения между исследуемыми поверхностями. Причем концентрация органических загрязнений вычисляется усреднением концентраций, соответствующих коэффициентам трения покоя и скольжения, что позволило повысить чувствительность метода с  $10^{-9}$  г/см<sup>2</sup> до  $5 \cdot 10^{-10}$  г/см<sup>2</sup>.

## Благодарности

Работа выполнена при поддержке грантов Президента Российской Федерации для поддержки молодых российских ученых - докторов наук (№ МД-5205.2016.9) и Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 16-07-00494 А).

## Литература

1. Rochat, N. Multiple Internal Reflection Infrared Spectroscopy Using Two-Prism Coupling Geometry: A Convenient Way for Quantitative Study of Organic Contamination on Silicon Wafers / N. Rochat, M. Olivier, A. Chabli, F. Conne, G. Lefeuvre, C. Boll-Burdet // *Appl. Phys. Lett.* – 2000. – Vol. 77, № 14. – P. 2249-2251.
2. New ISO Draft Standard Classifies Surface Particle Cleanliness // *Journal of IEST.* – 2007. – Vol. 50, № 2. – P. 1-4.
3. Zhang, X. A Wireless and Passive Wafer Cleanliness Monitoring Unit via Electromagnetic Coupling for Semiconductor/MEMS Manufacturing Facilities / X. Zhang, J. Chae // *Sens. Actuator A- Phys.* – 2011. – Vol. 171. – P. 414-420.
4. Kazanskiy, N.L. Interaction of Dielectric Substrates in the Course of Tribometric Assessment of the Surface Cleanliness / N.L. Kazanskiy, S.V. Karpeev, V.A. Kolpakov, S.V. Krichevsky, N.A. Ivliev // *Optical Memory and Neural Networks.* – 2008. – Vol. 17, № 1. – P. 37-42.
5. Kazanskiy, N.L. Parameter Optimization of a Tribometric Device for Rapid Assessment of Substrate Surface Cleanliness / N.L. Kazanskiy, V.A. Kolpakov, A.I. Kolpakov, S.V. Krichevsky, N.A. Ivliev, M.V. Desjatov // *Optical Memory and Neural Networks.* – 2008. – Vol. 17, № 2. – P. 167-172.
6. Goddard, J. Optically Resonant Nanophotonic Devices for Label-Free Biomolecular Detection / J. Goddard, S. Mandal, Erickson D // *Advanced Photonic Structures for Biological and Chemical Detection Integrated Analytical Systems.* – 2009. – P. 445.
7. Lin, M.C. Metal Hard Mask Employed Cu/Low k Film Post Ash and Wet Clean Process Optimization and Integration into 65 nm Manufacturing Flow/ M.C. Lin, M.Q. Wang, J. Lai, R. Huang, C.M. Weng, J.H. Liao, J.S. Tang, C.H. Weng, W. Lu, H.W. Chen, J.T.C. Lee // *Solid State Phenomena.* – 2007. – Vol. 134. – P. 359-362.
8. Liu, Y.J. Impact of Organic Contamination on the Electrical Properties of Hydrogen-Terminated Silicon under Ambient Conditions / Y.J. Liu, D.M. Waugh, H.Z. Yu // *Appl. Phys. Lett.* – 2002. – Vol. 81, № 26. – P. 4967-4969.
9. Alberici, S., Organic Contamination Study for Adhesion Enhancement between Final Passivation Surface and Packaging Molding Compound / S. Alberici, A. Dellafiore, G. Manzo, G. Santospirito, C.M. Villa, L. Zanotti // *Microelectron. Eng.* – 2004. – № 76. – P. 227-234.
10. Khanna, V.K. Adhesion–Delamination Phenomena at the Surfaces and Interfaces in Microelectronics and MEMS Structures and Packaged Devices / V.K. Khanna // *J. Phys. D: Appl. Phys.* – 2011. – Vol. 44. – P. 1-19.
11. Kim, K.S. Effects of Organic Contaminants during Metal Oxide Semiconductor Processes / K.S. Kim, J.Y. Kim, Kang H.B., Lee B.Y., Park S.M. // *J. Electrochem. Soc.* – 2008. – Vol. 155, № 6. – P. H426-H431.
12. Изотов, П.Ю. Модификация прибора индикации чистоты и гладкости оптических подложек / П.Ю. Изотов, М.С. Глянько, С.В. Суханов // *Компьютерная оптика.* – 2011. – Т. 35, № 1. – С. 63-69.
13. Подлипнов, В.В. Математическая модель прибора контроля чистоты поверхности подложек по скорости растекания капли жидкости / В.В. Подлипнов, А.С. Дубовик // *Научное приборостроение.* – 2012. – Т. 22, № 2. – С. 74.

14. Полтавцев, Ю.Г. Технология обработки поверхностей в микроэлектронике / Ю.Г. Полтавцев, А.С. Князев – Киев: Техника, 1990. – 206 с.
15. Meurk, A. Microscopic stick-slip in friction force microscopy / A. Meurk // Tribology Lett. – 2000. – Vol. 8, № 2-3. – P. 161-169.
16. Казанский, Н.Л. Формирование оптического микрорельефа во внеэлектродной плазме высоковольтного газового разряда: Монография / Н.Л. Казанский, В.А. Колпаков. – М.: Радио и связь, 2009. – 220с.