

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ТРИБОМЕТРИЧЕСКОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОДЛОЖЕК ПРИ ЭКСПРЕСС-КОНТРОЛЕ СТЕПЕНИ ЧИСТОТЫ ИХ ПОВЕРХНОСТИ

Н.Л. Казанский^{1,2}, В.А. Колпаков^{1,2}, А.И. Колпаков^{1,2}, С.В. Кричевский^{1,2}, Н.А. Ивлиев^{1,2}

¹Институт систем обработки изображений РАН, Самара, Россия,

²Самарский государственный аэрокосмический университет, Самара, Россия

Аннотация

Теоретически и экспериментально исследованы особенности трибометрического взаимодействия двух диэлектрических подложек с одинаковыми свойствами поверхности при экспресс-контроле степени их чистоты. Показано, что выполнение равенства коэффициента трения скольжения коэффициенту трения покоя определяет поверхность как технологически чистой. Экспериментально доказано, что трибометрическое взаимодействие подложек не приводит к механическому повреждению исследуемой поверхности. Предложено дополнить устройство дифракционной решеткой, формирующей световые импульсы, по параметрам которых (длительность импульсов светового потока; среднее значение суммы трёх импульсов, степень их отклонения от эталонных значений) происходит оценка степени загрязнения поверхности подложек. Показано, что применение дифракционной решетки с периодом $T=63$ мкм и шириной щели $b=20$ мкм позволяет увеличить разрешающую способность трибометрического устройства в 16 раз.

Введение

Существующие методы экспресс-контроля чистоты поверхности подложек в большинстве практических случаев основаны на использовании эффектов смачиваемости, контактной разности потенциалов и трения покоя [1, 2]. Однако устройства, реализующие эти эффекты, требуют при эксплуатации применения жидкостей или зондов со специальными свойствами поверхности, т.к. относительно их эталонных свойств происходит вычисление степени загрязнения исследуемой поверхности. Это значительно усложняет их использование в технологическом процессе без изменения свойств исследуемой поверхности.

Методы трибометрии позволяют контролировать чистоту поверхности подложек в диапазоне 10^{-6} - 10^{-9} г/см², что соответствует технологически чистым поверхностям, используемым в микроэлектронике [3]. Достижение таких параметров становится возможным при строгой изоляции поверхности зонда от окружающей среды и ее очистке дорогостоящими или экологически вредными жидкостями. Простейший случай очистки заключается в обезжиривании поверхности трихлорэтиленом и отжиге пластин в термошкафу типа Spt 200 при 300 °С в течение двух часов [2].

В работах [4, 5, 6] описано устройство, реализующее трибометрическое взаимодействие двух диэлектрических подложек с одинаковой степенью загрязнения для измерения степени чистоты их поверхности, что значительно упростило как конструкцию устройства, так и процесс измерения. Однако в данных работах отсутствует физическое описание особенностей процесса измерения. Кроме того, при трибометрическом взаимодействии возможны механические повреждения структуры поверхности. Развитие нанотехнологий, в свою очередь, требует повышения точности

контроля чистоты поверхности. В связи с этим, целью настоящей работы является исследование особенностей трибометрического взаимодействия двух подложек, имеющих одинаковую степень чистоты, увеличение точности ее контроля и разрешающей способности устройства, предложенного в работе [4].

Практическое применение трибометрического устройства для контроля чистоты поверхности подложек требует уточнения особенностей механизма трибометрического взаимодействия поверхностей в структуре подложка – загрязнения – подложка.

Методика эксперимента

В качестве исходных образцов использовались подложки диоксида кремния (SiO₂), СТ-50 размером 24x30 мм² (см. рис. 1а, б).

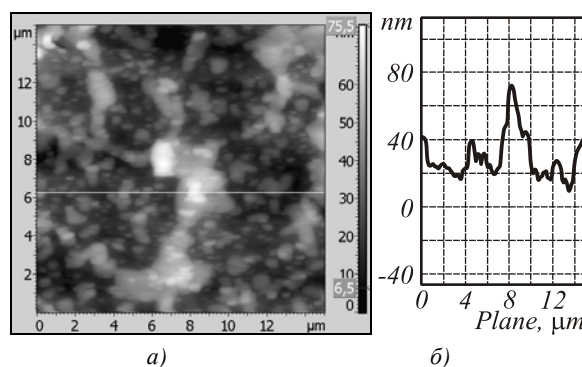


Рис. 1. Вид поверхности исследуемой подложки, полученный на сканирующем зондовом микроскопе (СЗМ) Solver PRO-M фирмы «НТ-МДТ»: а) - в режиме силового сканирования (белой линией обозначен след прохождения кантеливера СЗМ); б) – профилограмма

Контролируемое загрязнение создавали в замкнутом объеме кварцевого сосуда согласно методике [7]. Толщина слоя молекул органических загрязнений (вакуумное масло ВМ-1) контролирова-

лась сканирующим зондовым микроскопом (СЗМ) Solver PRO-M.

Очистка поверхности подложек от органических загрязнений осуществлялась путем облучения исследуемых структур потоком плазмы, формируемым газоразрядным устройством высоковольтного типа [8]. Диапазоны изменений значений ускоряющего напряжения, тока разряда и длительности облучения составили 0 – 5 кВ, 0 – 3 мА, 5-180 секунд, соответственно. Диапазон изменения тока разряда выбирался из соображений обеспечения минимального нагрева подложки и исключения дефектообразования на ее поверхности. Рабочим газом служил воздух. Схема расположения подложек в трибометрическом устройстве представлена на рис. 2а, б. Для обеспечения достоверности и воспроизводимости результатов эксперимента каждый режим повторялся на десяти одинаковых образцах. Разброс значений измеряемой концентрации загрязнений на поверхности составил не более 10%.

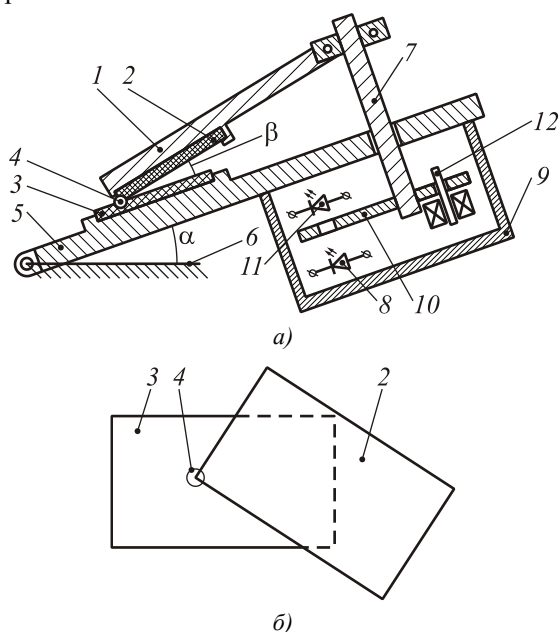


Рис. 2. Схема расположения подложкодержателей (а) и подложек (б) в трибометрическом устройстве:

- 1 – подложкодержатель подложки-зонда;
- 2 – подложка-зонд; 3 – исследуемая подложка;
- 4 – точка взаимодействия двух подложек;
- 5 – подложкодержатель подложки, используемой для исследований степени чистоты поверхности;
- 6 – крышка трибометрического устройства;
- 7 – штанга крепления подложкодержателя подложки-зонда; 8 – источник света; 9 – светонепроницаемая крышка; 10 – металлический диск; 11 – фотозлемент;
- 12 – фиксатор штанги

Для обеспечения процесса скольжения подложки-зонда свободный конец подложкодержателя исследуемой подложки с помощью подвижного соединения поднимают относительно крышки трибометрического устройства на некоторый угол α [7]. В исходной позиции подложкодержатель, а, следовательно, и рабочая поверхность точки взаимодействия двух под-

ложек перемещается в самую высокую часть исследуемой поверхности, и закрепляется с помощью штанги крепления подложкодержателя подложки-зонда. В данный момент световой поток, формируемый источником света, закрепленным специальной конструкцией на внутренней поверхности светонепроницаемой крышки, попадает на металлический диск, жестко закрепленный на оси конструкции подложкодержателя подложки-зонда. По радиусу диска ($R=160$ мм) выполнены 3-8 окон диаметром 1 мм, через которые световой поток попадает на поверхность фотозлемента. Прохождение луча света через первое окно фиксируется как точка отсчета. При отжиме фиксатора штанги, удерживающего подложкодержатель подложки-зонда, подложка-зонд скользит вниз. Поскольку металлический диск с окнами жестко закреплен на оси конструкции подложкодержателя подложки-зонда, то световой поток, поочередно попадая в окна, формирует импульсы тока в цепи фотодиода, длительность которых (τ) характеризует величину скорости скольжения, которая, в свою очередь, определяет численное значение коэффициента трения скольжения μ .

Таким образом, величина длительности световых импульсов содержит информацию о коэффициенте трения скольжения и, следовательно, о чистоте поверхности: более грязной поверхности соответствует меньшая длительность импульса и наоборот.

Особенности трибометрического взаимодействия двух подложек с одинаковыми свойствами

Принцип измерения заключается в том, что подложку, на поверхности которой необходимо измерить степень загрязнения, помещают в подложкодержатель, имеющий с осью абсцисс некоторый угол. Конкретная величина этого угла определяется массой подложкодержателя подложки-зонда, общий вес которого ограничен условиями появления механических деформаций, проявляемых в виде механических нарушений поверхности рис. 3а, б.

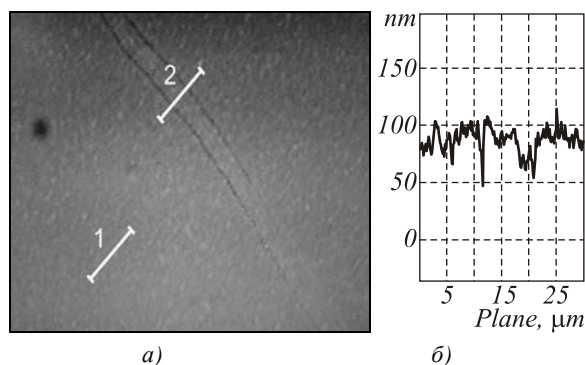


Рис. 3. Структура исследуемой поверхности, полученная на СЗМ Solver PRO-M фирмы «НТ-МДТ»:

- а) – в режиме силового сканирования в области прохождения подложки-зонда с нагрузкой: 1 – 0,3 кГ; 2 – 0,5 кГ; б) – профилограмма в области 2

Сравнение структур поверхностей в области участков 1, 2 (рис. 3а) и представленных на рис. 1а, б показывает, что при увеличении давления подложки-зонда на исследуемую поверхность (участок поверхности 2) происходит механическое разрушение острых пиков и поверхность в области прохождения подложки-зонда сглаживается.

При уменьшении величины груза, приложенного к подложкодержателю подложки-зонда до 0,3 кГ и менее, точечное воздействие подложки-зонда на исследуемую поверхность не приводит к ее разрушению, что следует из анализа соответствующего участка в области прохождения подложки-зонда 1 (рис. 3а).

Поверхность подложки-зонда составляет угол $\beta=5^{\circ}-10^{\circ}$ с поверхностью исследуемой подложки, что обеспечивает их взаимодействие в точке. При уменьшении угла менее 5° наблюдается заметное отклонение области взаимодействия подложек от точки, приводящее к зависимости результатов измерения от площади их контакта.

Увеличение угла более 10° приводит к взаимодействию острых боковых граней подложки-зонда с исследуемой поверхностью, в результате которого образуются царапины (рис. 4).

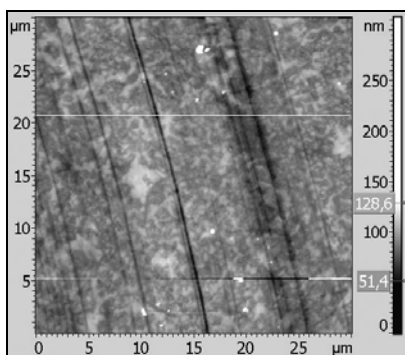


Рис. 4. Вид поверхности в зоне прохождения подложки-зонда при угле ее наклона более 10° (белой линией обозначен след прохождения кантеливера СЗМ)

Высокая чувствительность поверхности подложки к изменению угла подъема подложкодержателя α (см. рис. 2), требует определения оптимального диапазона его значений, в области которого подложка-зонд не деформирует структуру поверхности исследуемой подложки. Экспериментальное определение диапазона представляет достаточно трудоемкую задачу, т.к. требует использования при измерениях эталонных поверхностей. Поэтому в настоящей работе предлагается определить их расчетным путем. Для этого необходимо найти аналитическую связь между углом α и μ , пользуясь следующими рассуждениями. Пусть подложка-зонд движется по исследуемой подложке с ускорением a , тогда в области взаимодействия подложек действуют три силы: $m\vec{g}$ – сила тяжести, под действием которой происходит движение; \vec{N} – сила реакции опоры; $\vec{F}_{тр}$ – сила трения скольжения (рис. 5). Тогда зависимость $\mu=f(\alpha, \beta)$ можно представить равенством:

$$\mu = \frac{\cos[90 + (\alpha + \beta)]}{\cos \alpha \cos \beta} - \frac{a}{g \cos \alpha} - \operatorname{tg} \beta \quad (1)$$

При увеличении угла α можно получить его критическое значение, при котором движение подложки-зонда будет определяться уже не только свойствами поверхности исследуемой подложки, но и ускорением свободного падения, что приведет к значительному искажению получаемых результатов измерения. Отсюда следует необходимость выполнения неравенства $(\alpha + \beta) < 90^{\circ}$.

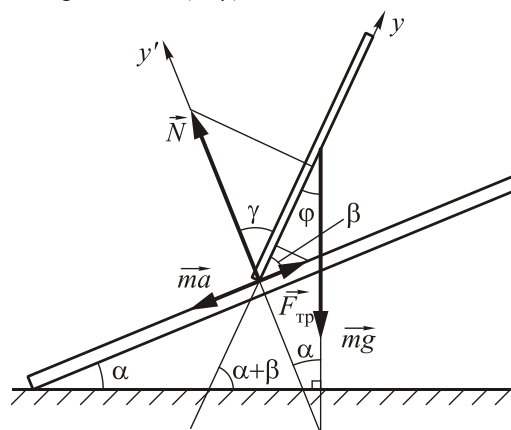


Рис. 5. Расположение сил, возникающих при взаимодействии подложек:
 α – угол, который исследуемая подложка составляет с горизонтом;
 β – угол между поверхностями взаимодействующих подложек

С другой стороны, если осуществляется трибометрический контакт технологически чистых поверхностей, то при некотором значении угла α подложка-зонд перестает скользить по исследуемой поверхности, т.к. выполняется равенство $\mu = \mu_{тр.л}$, где $\mu_{тр.л}$ – коэффициент трения покоя [9].

Для диоксида кремния с технологически чистой поверхностью коэффициент трения покоя равен 1 [10]. При выполнении данных условий и подстановке экспериментально найденного значения $\beta=6^{\circ}$ [7] в (1) получим $\operatorname{tg} \alpha = 1$. Таким образом, технологически чистой поверхности подложки соответствует $\alpha = 45^{\circ}$. Данное значение угла α хорошо согласуется с экспериментальными кривыми (рис. 6), т.к. попадает в середину диапазонов, в области которых наблюдаются незначительные зависимости $\alpha=f(\tau)$. Из этого следует, что $\alpha = 45^{\circ}$ можно использовать для широкого диапазона, как материалов подложки, так и типов загрязнений. С другой стороны, характер изменения кривой показывает, что процесс скольжения формируется из двух механизмов: скольжения подложки-зонда по исследуемой поверхности и его свободного падения. Первый случай реализуется при $\alpha \leq 60^{\circ}$. Изменения длительности светового импульса на данном участке кривой имеют линейный характер и не превышают 33%. Поскольку они обусловлены увеличением потенциаль-

ной энергии подложки-зонда, то легко определяются расчетным путем и используются в качестве поправочного коэффициента при расчете коэффициента трения скольжения. На участке $\alpha > 60^\circ$ происходит уменьшение сил сцепления между подложкой – зондом и исследуемой поверхностью, причем при $\alpha = 90^\circ$ подложка-зонд находится практически в условиях свободного падения. Именно этим объясняется нарастающее увеличение скорости движения подложки-зонда в диапазоне $60^\circ < \alpha < 70^\circ$. Следовательно, выберем для проведения измерений интервал значений угла α : $50^\circ < \alpha \leq 60^\circ$, для которых имеется слабая зависимость $\tau = f(\alpha)$, а, значит, показания трибометра являются стабильными и достоверными.

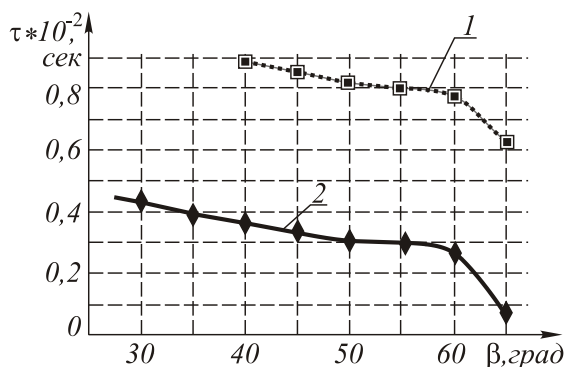


Рис. 6. Зависимость длительности световых импульсов от угла наклона исследуемой подложки при $\beta = 5,5^\circ$: 1 - серия подложек с исходной степенью загрязнения, соответствующей значению $\tau = 0,9$; 2 - то же, но $\tau = 0,45$

Повышение разрешающей способности трибометрического устройства

Для увеличения точности контроля и разрешающей способности устройства в область отверстия в металлическом диске помещали дифракционную решетку, которая в данном случае разбивает световой поток, формируемый светодиодом в области окна металлического диска, на совокупность вторичных источников света. В области апертуры фотоприемника эти источники должны изображаться раздельно и давать картину максимумов и минимумов интенсивности светового потока. Световые потоки от вторичных источников на некотором расстоянии R от дифракционной решетки смешиваются, делая практически невозможной их регистрацию от отдельных щелей.

Для регистрации световых потоков от отдельных щелей дифракционной решетки необходимо определить численные значения периода решетки и расстояние до фотоприемника R .

При дифракции на одной щели 90% [11] интенсивности светового потока распространяется в пределах угла в направлении точки наблюдения $\alpha = 2\lambda/b$, где λ – длина волны света; b – ширина щели. Максимумы второго, третьего и k -го порядков в этом случае не оказывают заметного влияния при сложении с максимумами первого порядка, следовательно, минимально допустимый период решетки опре-

деляется из условия непересечения первых порядков дифракции от соседних щелей $T = \frac{2\lambda R}{\sqrt{b^2 - \lambda^2}}$.

Таким образом, если источником света является полупроводниковый светодиод с длиной волны $\lambda = 0,63$ мкм, а ширина b щели дифракционной решетки равна 20 мкм, выражение для периода решетки принимает вид $T = 0,063R$, т.е. период дифракционной решетки находится в прямопропорциональной зависимости от расстояния между решеткой и экраном приемника излучения. Для успешного функционирования прибора, в котором $R = 1$ мм период решетки составит 63 мкм. Сравнительный анализ размеров отверстия в металлическом диске и периода дифракционной решетки позволяет сделать вывод: применение дифракционной структуры повышает разрешающую способность трибометрического устройства в 16 раз путем разбиения траектории скольжения подложки-зонда на участки протяженностью 63 мкм, в области которых и осуществляется измерение чистоты поверхности подложки. Длительность полученных импульсов определяется величиной коэффициента трения скольжения и фиксируется блоком управления и обработки информации в качестве критерия степени чистоты исследуемой поверхности.

Заключение

В настоящей работе теоретически и экспериментально исследованы особенности трибометрического взаимодействия двух подложек с одинаковыми свойствами поверхности, причем одна из них использовалась в качестве зонда. Результаты исследований позволяют установить связь между свойствами поверхности подложек и параметрами трибометрического устройства (скорость скольжения подложки-зонда, углы наклона подложек относительно друг друга и горизонта). На конкретном примере трибометрического взаимодействия подложек показано хорошее соответствие между ними, что позволяет осуществить экспресс-контроль чистоты поверхности непосредственно при формировании маскирующих слоев, используемых как в микро-, наноэлектронике, так и дифракционной оптике. Экспериментально доказано: выполнение равенства $\mu = \mu_{тр,н}$ определяет поверхность как технологически чистую; углы наклона подложки-зонда к исследуемой поверхности и плоскости подложкодержателя исследуемой подложки не должны выходить за пределы диапазонов $5^\circ \leq \beta \leq 10^\circ$ и $50^\circ < \alpha \leq 60^\circ$, соответственно; трибометрическое взаимодействие подложек не приводит к механическому повреждению исследуемой поверхности; применение дифракционной решетки с периодом $T = 63$ мкм и шириной щели $b = 20$ мкм позволяет увеличить разрешающую способность трибометрического устройства в 16 раз.

Полученные результаты позволяют повысить качество контроля степени чистоты поверхности подложек, адгезию маскирующих слоев, и как след-

ствие, формируемых оптического микро-рельефа, микро- и наноструктур.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ, Правительства Самарской области и Американского фонда гражданских исследований и развития (грант CRDF RUX0-014-SA-06), грантов российско-американской программы «Фундаментальные исследования и высшее образование» (BRHE) (№УЗ-Р-14-03), аналитической ведомственной целевой программы Федерального агентства по образованию «Развитие научного потенциала высшей школы» (№РНП 2.2.2.3.1289) и инновационной образовательной программы СГАУ «Развитие центра компетенции и подготовка специалистов мирового уровня в области аэрокосмических и геоинформационных технологий» и гранта Президента Российской Федерации для поддержки молодых российских ученых МК-3038.2007.9.

Литература

1. Колпаков А.И. Метод определения чистоты поверхности подложек // Электронная промышленность. 1993. № 4. С. 37-39.
2. Полтавцев Ю.Г., Князев А.С. Технология обработки поверхностей в микроэлектронике. – К.: Техника, 1990. – 205 с.
3. Перескокова А.П., Солодовникова Л.В., Акимова А.М. Применение трибометрического метода для контроля чистоты поверхности деталей и технологических сред // Электронная техника: Технология, организация производства и оборудование, 1979. Серия №7. Вып. 1. С. 143-151.
4. Колпаков В.А., Колпаков А.И., Кричевский С.В. Устройство экспресс-контроля чистоты поверхности диэлектрических подложек // Приборы и техника эксперимента, 1995. №5. С. 199-200.
5. Пиганов М.Н., Колпаков А.И., Кричевский С.В. Устройство экспресс контроля чистоты поверхности подложек трибометрическим методом // Тезисы докладов международной научно-технической конференции «Перспективные технологии в средствах передачи информации», - Владимир, 1995. С. 155-157.
6. Колпаков А.И., Волков А.В. Способ измерения чистоты поверхности подложек Авторское свидетельство № 1821688, Бюл. № 22, от 15.06.93. С. 95.
7. Казанский Н.Л., Колпаков В.А., Колпаков А.И., Кричевский С.В., Ивлиев Н.А. Оптимизация параметров устройства трибометрического измерения чистоты поверхности подложек // Компьютерная оптика. № 28, 2005. С. 76-79.
8. Казанский Н.Л., Колпаков В.А., Колпаков А.И. Исследование особенностей процесса анизотропного травления диоксида кремния в плазме газового разряда высоковольтного типа // Микроэлектроника. 2004. Т. 33. № 3. С. 209-224.
9. Казанский Н.Л., Колпаков В.А., Кричевский С.В., Ивлиев Н.А. Способ измерения чистоты поверхности подложек // Решение о выдаче патента на изобретение по заявке № 2005118279 /28(020754) от 10.01.07.
10. Бакли Д. Поверхностные явления при адгезии и трении в контакте // М.: Машиностроение. 1989. С. 14.
11. Методы компьютерной оптики // Под ред. Соифера В.А. – М.: Физматлит, 2003. – 688 с.

STUDYING PECULIARITIES OF INTERACTION OF DIELECTRIC SUBSTRATES IN THE COURSE OF TRIBOMETRIC ASSESSMENT OF THE SURFACE CLEANLINESS

N.L. Kazanskiy^{1,2}, V.A. Kolpakov^{1,2}, A.I. Kolpakov^{1,2}, S.V. Krichevskiy^{1,2}, N.A. Ivliev^{1,2}

¹Image Processing Systems Institute of the RAS, Samara, Russia,

²Samara State Aerospace University (SSAU), Samara, Russia

Abstract

We look into theoretical and experimental aspects of tribometric interaction between two dielectric substrates with identical surfaces in the course of rapid analysis of their cleanliness. It is shown that if the coefficient of sliding friction equals that of static friction the surface can be defined as being of production grade. The tribometric interaction of the substrates is experimentally shown not to result in a mechanical damage of the surface under study. It is suggested that the device should be complemented by a diffraction grating that generates light pulses. Based on the grating parameters, such as light pulse duration, average sum of three pulses, and degree of their deviation from reference values, the level of substrate surface cleanliness is assessed. The use of the diffraction grating of period $T = 63 \mu\text{m}$ and slit width $b = 20 \mu\text{m}$ is shown to provide a 16-fold increase in the resolution of the tribometric device.

Keywords: surface, dielectric substrates, cleanliness, tribometric device.

Citation: Kazanskiy NL, Kolpakov VA, Kolpakov AI, Krichevskiy SV, Ivliev NA. Studying peculiarities of interaction of dielectric substrates in the course of tribometric assessment of the surface cleanliness [In Russian]. Computer Optics 2007; 31(1): 42-46.

Acknowledgements: The work was partly supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation, the Government of Samara Region and American Civilian Research and Development Foundation (grant CRDF RUX0-014-SA-06), within the framework of grants of the Russian-American Basic Research and Higher Education Program (BRHE) (No. 3-P-14-03), under the Development of Scientific Potential in Higher Education Scientific Program of the Federal Education Agency (No. RNP 2.2.2.3.1289), the Innovation Educational Program of SSAU "Development of a Competence Centre and Training of Global Specialists in Aerospace and Geoinformational Technologies" and within the framework of the grant of the President of the Russian Federation for the support of young Russian scientists MK-3038.2007.9.

References:

- [1] Kolpakov AI. Method for measuring the substrate surface cleanliness [In Russian]. Electronics Industry 1993; 4: 37-39.
- [2] Poltavtsev YuG, Knyazev AS. Technology of surface processing in microelectronics [In Russian]. Kiev: "Tekhnika" Publisher 1990: 205 p.
- [3] Pereskokova AP, Solodovnikova LV, Akimova AM. Application of the tribometry method for assessment of components and processing media surface cleanliness [In Russian]. Electronic Engineering: Production, Industrial Engineering and Equipment 1979; 7(1): 143-151.
- [4] Kolpakov VA, Kolpakov AI, Krichevskiy SV. A device for the express-control of the surface finish of dielectric substrates. Pribory i Tekhnika Eksperimenta 1995; (5): 199-200.
- [5] Piganov MN, Kolpakov AI, Krichevskiy SV. A device for rapid assessment of surface cleanliness of substrates by the tribometry method [In Russian]. Vladimir: Proceedings of the International Scientific and Technical Conference "Advance Technologies in Information Media" 1995: 155-157.
- [6] Kolpakov AI, Volkov AV. A technique for measuring the substrate surface cleanliness [In Russian]. Author's Certificate No. 1821688 dated 15.06.93; 22: 95.
- [7] Kazanskiy NL, Kolpakov VA, Kolpakov AI, Krichevskiy SV, Ivliev NA. Parameter optimization of a tribometric device for substrate surface cleanliness measurement [In Russian]. Computer Optics 2005; 28: 76-79.
- [8] Kazanskiy NL, Kolpakov VA, Kolpakov AI. Anisotropic etching of SiO₂ in high-voltage gas-discharge plasmas. Russian Microelectronics 2004; 33(3): 169-182.
- [9] Kazanskiy NL, Kolpakov VA, Krichevskiy SV, Ivliev NA. A technique for measuring the substrate surface cleanliness [In Russian]. Decision on patent grant application No. № 2005118279 /28(020754) dated 10.01.07.
- [10] Bakli D. Surface phenomena upon adhesion and friction interaction [In Russian]. Moscow: "Mashinostroenie" Publisher 1989: 14.
- [11] Volkov AV, Golovashkin DL, Doskolovich LL, Kazanskiy NL, Kotlyar VV, Pavelyev VS, Skidanov RV, Soifer VA (ed.), Solovjev VS, Uspleneyev GV, Kharitonov SI, Khonina SN. Methods for Computer Design of Diffractive Optical Elements. New York: John Wiley & Sons, Inc. 2002; 784p.