

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ УСТРОЙСТВА ТРИБОМЕТРИЧЕСКОГО ИЗМЕРЕНИЯ ЧИСТОТЫ ПОВЕРХНОСТИ ПОДЛОЖЕК

Н.Л. Казанский, В.А. Колпаков, А.И. Колпаков, С.В. Кричевский, Н.А. Ивлиев

Институт систем обработки изображений РАН

Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева

Аннотация

Проведена оптимизация параметров и режимов работы устройства экспресс-контроля чистоты поверхности, реализующего метод трибометрического взаимодействия двух подложек. В результате оптимизации определены количественные значения параметров и режимы работы устройства, при которых осуществляется прецизионное измерение чистоты поверхности подложек. Показано, что применение совместно с устройством экспресс-контроля компьютерного анализа обеспечивает возможность многократного использования подложки-индентора при контроле чистоты всей площади поверхности подложек, а также поверхностей с разной степенью загрязнения.

Введение

Повышение степени чистоты поверхности диэлектрической подложки значительно увеличивает качество и воспроизводимость параметров маскирующего слоя на ее поверхности, сформированного по тонкопленочной технологии [1]. В связи с этим контроль чистоты поверхности является важнейшей технологической операцией при изготовлении дифракционных оптических элементов [2]. Большинство современных экспресс-методов контроля чистоты основаны на методах смачиваемости и трибометрии [3]. В первом случае молекулы воды, остающиеся на поверхности после операции контроля, диссоциируют на ионы H^+ и OH^- загрязняют поверхность, что приводит к нарушению геометрических параметров формируемого дифракционного микрорельефа. Во втором случае в результате использования в качестве критерия чистоты коэффициента трения покоя, специально подготовленный зонд (индентор), сообщая исследуемой поверхности импульс значительной величины, обусловленный их длительным взаимодействием, продавлиывает под действием силы тяжести слой загрязнений. В области продавливания контакт индентора происходит с поверхностными атомами подложки, а не с атомами загрязнений (рис. 1а). Возникает погрешность измерений, объясняемая данным явлением.

Для устранения вышеперечисленных недостатков в работах [4, 5] предлагается использовать для контроля степени чистоты поверхности метод трибометрического взаимодействия двух подложек и реализующее его устройство экспресс-контроля (трибометр). Использование в качестве критерия чистоты коэффициента трения скольжения позволяет минимизировать величину импульса, передаваемого подложкой-индентором контролируемой подложке в области их контакта, и осуществить измерение электронных связей непосредственно между атомами загрязняющих поверхность и поверхности индентора (рис. 1б).

Применение устройства экспресс-контроля для прецизионного измерения чистоты поверхности подложек требует оптимизации его параметров. Цель работы – оптимизация параметров и режимов работы устройства трибометрического измерения чистоты поверхности подложек.

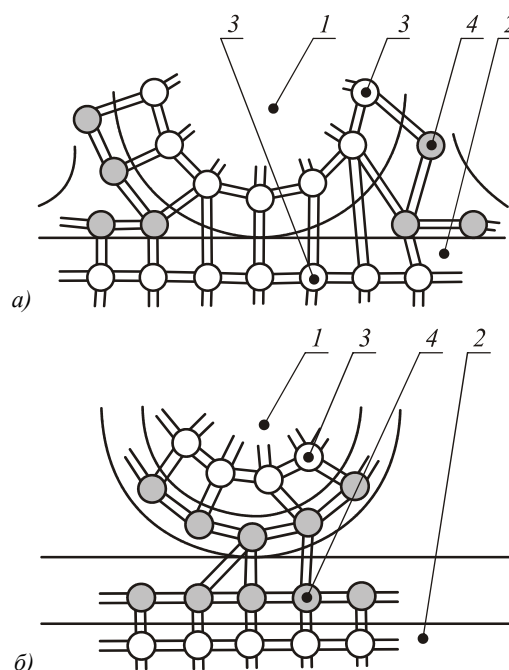


Рис. 1. Схема взаимодействия зонда с подложкой: а) установление электронных связей в случае использования в качестве критерия чистоты коэффициента трения покоя; б) установление электронных связей в случае скольжения зонда по подложке: 1 - зонд; 2 - контрольная подложка; 3 - поверхностные атомы; 4 - атомы загрязнений

Методика эксперимента

Согласно [5] на оси вращения держателя подложки-индентора жестко закреплена шторка, в которой по радиусу 160 мм выполняются от 3 до 8 отверстий диаметром 1 мм. Величина диаметра отверстия и скорость скольжения подложки-индентора относительно исследуемой поверхности определяют длительность освещения светодиода фотодиода оптопары, т.е. длительность импульса (τ), выводимую электронной схемой на цифровое табло трибометра. Таким образом, величина τ содержит информацию о коэффициенте трения скольжения μ , как следствие, о чистоте поверхности: более грязной поверхности соответствует меньшая длительность импульса и наоборот.

В качестве исходных образцов использовались подложки диоксида кремния (SiO_2) размером $24 \times 30 \text{ мм}^2$, поверхность которых обрабатывалась направленным потоком низкотемпературной плазмы [6] до уровня технологической чистоты.

Контролируемое загрязнение проводили в замкнутом объеме кварцевого сосуда, схема конструкции которого представлена на рис. 2.

В кварцевый сосуд помещалась подложка диоксида кремния (см. рис. 2), после чего на внутреннюю поверхность крышки кварцевого сосуда наносились капли вакуумного масла (ВМ-1). Кварцевый сосуд закрывался крышкой и помещался в рабочую камеру вакуумной установки УВН-2М-1, которая откачивалась до давления $1,33 \text{ Па}$ при температуре 300 К . При таких условиях с поверхности капель происходит испарение молекул масла, являющихся источником органических загрязнений, длина свободного пробега которых равна расстоянию (h) (рис. 2) между поверхностью капель и исследуемой подложкой ($\approx 5 \text{ мм}$). Молекулы достигают поверхности подложки без взаимодействия с молекулами других соединений, содержащихся в вакуумной камере, что обеспечивает однородность свойств загрязнений, адсорбированных на ее поверхности.

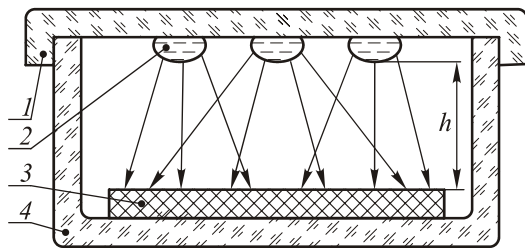


Рис. 2. Схема конструкции устройства загрязнения поверхности подложек: 1 - крышка кварцевого сосуда; 2 - капли вакуумного масла (ВМ-1); 3 - подложка диоксида кремния; 4 - кварцевый сосуд

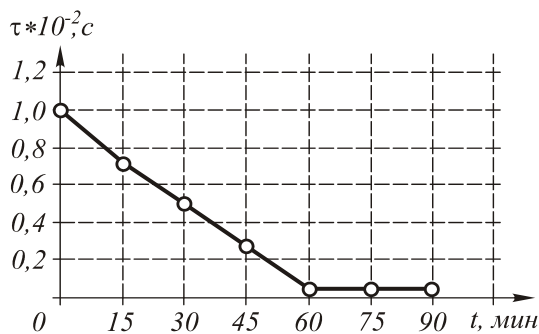


Рис. 3. Зависимость показаний устройства от времени выдержки подложек в устройстве загрязнения, помещенного в вакуумную камеру при углах наклона индентора $\alpha = 5,5^\circ$, подложкодержателя $\beta = 60^\circ$ [4, 5]

Для проверки достоверности и воспроизводимости результатов эксперимента каждый режим повторялся не менее десяти раз, разброс параметров при этом составлял не более 10%. Точки на зависимостях представляют собой среднее значение величины τ по результатам измерения на десяти образцах.

Концентрацию загрязнений на исследуемой поверхности регулировали изменением длительности выдержки (t) подложек в устройстве загрязнения, помещенного в рабочую камеру вакуумной установки. Величина t изменялась в диапазоне $0 < t \leq 90$ мин. При $t = 60$ мин длительность импульса снижается до $0,05 \cdot 10^{-2} \text{ с}$ (рис. 3) и остается постоянной на участке $60 \leq t \leq 90$ мин, что обусловлено насыщением процесса загрязнения и стабилизацией коэффициента трения, которое согласно [3] наступает при концентрации органических загрязнений на поверхности подложки, равной $5 \cdot 10^{-6} \text{ г/см}^2$.

Оптимизация параметров

Для оптимизации режимов работы трибометра были проведены исследования зависимости степени влияния угла наклона подложки-индентора к исследуемой поверхности (α) на величину длительности импульса (рис. 4).

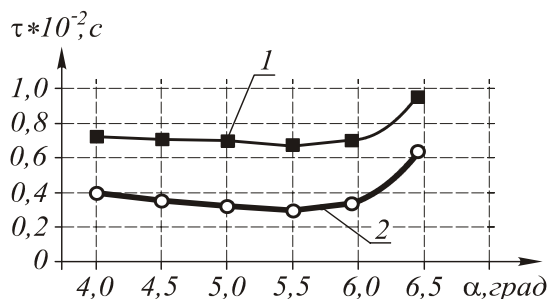


Рис. 4. Зависимость длительности импульса τ от угла наклона индентора α при $\beta = 60^\circ$: 1 - серия подложек с исходной степенью загрязнения, соответствующей значению $\tau = 0,65$; 2 - то же, но $\tau = 0,4$

Получение данной зависимости осуществлялось с помощью двух партий подложек с разной степенью чистоты их поверхности. Анализ кривых 1 и 2 показывает наличие у них слабовыраженного экстремума при $\alpha = 5,5^\circ$. С увеличением угла α происходит уменьшение площади контакта подложки-индентора с исследуемой поверхностью, и коэффициент трения скольжения в большей степени определяется свойствами слоя органических загрязнений, адсорбированных на поверхности подложки. Характер изменения кривых показывает, что в диапазоне $\alpha \leq 5,5^\circ$ влияние угла α на величину длительности светового импульса незначительно и при настройке трибометра его можно не учитывать.

В диапазоне $\alpha > 5,5^\circ$ площадь контакта настолько уменьшается, что подложка-индентор продавливает слой органического загрязнения, и в процессе скольжения начинает преобладать механическое взаимодействие подложек, приводящее к погрешности измерений, аналогичной погрешности метода, представленного в работе [3]. Подложка-индентор в этом случае подобна режущему инструменту, площадь контакта реза которого уменьшается с увеличением угла α .

Таким образом, в реальном устройстве для получения достоверных результатов о степени загрязне-

ния поверхности подложки угол α не должен превышать 6° .

Процесс скольжения определяется углом наклона плоскости подложкодержателя исследуемой подложки (β). Зависимость показаний трибометра от величины данного угла представлена на рис. 5.

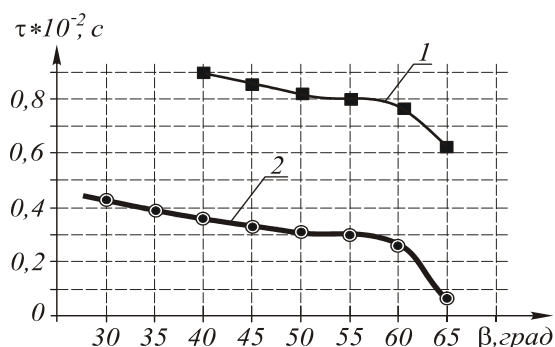


Рис. 5. Зависимость показаний устройства от угла наклона плоскости подложкодержателя исследуемой подложки при $\alpha = 5,5^\circ$:
1 - серия подложек с исходной степенью загрязнения, соответствующей значению $\tau = 0,9$;
2 - то же, но $\tau = 0,45$

Характер изменения кривых 1, 2 показывает, что процесс скольжения состоит из двух механизмов: 1 – механизм скольжения подложки – индентора по исследуемой поверхности; 2 – механизм его свободного падения. Первый случай реализуется при $\beta \leq 60^\circ$, так как изменения длительности светового импульса для обеих кривых на данном участке не превышают 33%. Это объясняется влиянием взаимодействия поверхности подложки-индентора с молекулами органических загрязнений (в этом диапазоне значений β) на коэффициент трения скольжения. На участке $\beta > 60^\circ$ происходит уменьшение сил сцепления между подложкой-индентором и исследуемой поверхностью, причем при $\beta = 90^\circ$ индентор находится практически в условиях свободного падения. Именно этим объясняется нарастающее увеличение скорости движения подложки-индентора в диапазоне $60^\circ < \beta < 70^\circ$. Анализируя вышеперечисленное, выберем для проведения прецизионных измерений интервал значений угла β : $50^\circ < \beta \leq 60^\circ$, на котором отсутствует зависимость $\tau = f(\beta)$, а значит, показания трибометра являются стабильными.

При контроле качества очистки методами трибометрии необходимо знать степень влияния воздействия самого индентора на свойства исследуемой поверхности. Вследствие этого, на рис. 6 приведены результаты исследования зависимости длительности импульса от числа проходов подложки-индентора по одной траектории на исследуемой поверхности для трех партий подложек с разной степенью загрязнения.

Из анализа характера изменения кривых 1, 2, 3, представленных на рис.6, следует вывод: в диапазоне $n \leq 3$ для образцов всех трех партий наблюдается практически отсутствие зависимости величины τ от числа проходов подложки-индентора, т.е. коэффициент трения скольжения в этом случае полностью

определяется концентрацией молекул органических загрязнений на исследуемой поверхности. Однако при $n > 3$ скорость движения подложки-индентора начинает замедляться (увеличение длительности импульса), что объясняется нарастанием механического взаимодействия между поверхностями двух подложек: с увеличением n число молекул загрязнений, соскребаемых индентором из области своей траектории скольжения, увеличивается. В случае $n > 15$ имеет место взаимодействие вида $\text{SiO}_2\text{-SiO}_2$, что подтверждает насыщение кривой 3 на данном участке. Таким образом, для получения достоверной информации при измерении чистоты поверхности подложек недопустимо использование подложки – индентора более трех раз по одной траектории.

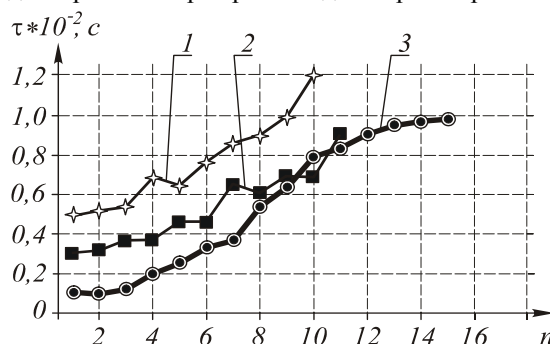


Рис. 6. Зависимость показаний устройства от числа проходов по одной траектории для трех партий подложек с разной степенью загрязнения:

1 - серия подложек с исходной степенью загрязнения, соответствующей значению $\tau = 0,45$;
2 - то же, но $\tau = 0,25$; 3 - то же, но $\tau = 0,1$

Контроль качества поверхности при формировании дифракционного микрорельефа требует информации о чистоте всей поверхности подложки. С целью выполнения данного требования в настоящей работе проведены исследования зависимости величины τ от числа измерений одним индентором всей площади поверхности исследуемой подложки (рис. 7).

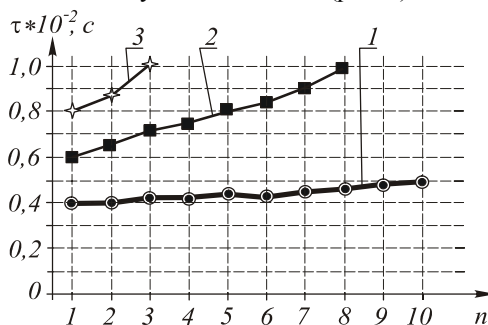


Рис. 7. Зависимость величины τ от числа измерений чистоты поверхности исследуемых подложек одним индентором: 1 – серия подложек с исходной степенью загрязнения, соответствующей значению $\tau = 0,4$; 2 – то же, но $\tau = 0,6$; 3 – то же, но $\tau = 0,8$

Из зависимостей, представленных на рис. 7, видно: на подложках с исходной степенью загрязнения, соответствующей значению $\tau = 0,4$ (кривая 1), подложку-индентор можно использовать до 8 раз, так

как показания трибометра изменяются в этом случае не более чем на 12%, что дает право на многократное его применение. С уменьшением степени загрязнения (увеличением τ) начинает преобладать механическое взаимодействие поверхностей подложек, приводящее к жесткой зависимости показаний трибометра от числа измерений (кривые 2, 3), что хорошо согласуется с результатами исследований, представленными на рис. 6. Другим важным свойством данных кривых является информация о том, что даже при однократном измерении трибометрический метод способен не только достоверно определять степень чистоты поверхности подложек, но и осуществлять их распределение по этому критерию. Следовательно, при применении компьютерного анализа появляется возможность многократного использования подложки-индентора и при контроле чистоты всей площади поверхности, а также поверхностей с разной степенью загрязнения.

На рис. 8. представлены результаты исследования зависимости показаний устройства от времени выдержки подложек на воздухе.

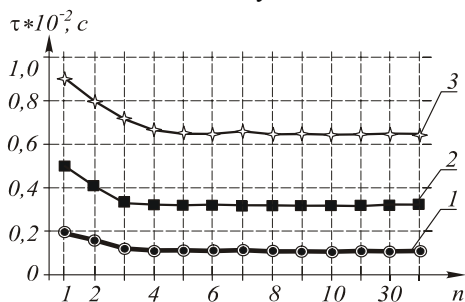


Рис. 8. Зависимость показаний устройства от времени выдержки подложек на воздухе:

- 1 – серия подложек с исходной степенью загрязнения, соответствующей значению $\tau=0,2$;
2 – то же, но $\tau=0,45$; 3 – то же, но $\tau=0,9$

Согласно полученным зависимостям, нахождение подложек, прошедших очистку, в контакте с внешней средой более 5 минут приводит к увеличению степени их загрязнения соответственно на 11%, 22%, 28%, причем, чем выше степень загрязнения подложки после очистки, тем медленнее происходит изменение чистоты её поверхности и на меньшую величину. Из этого следует, что подложки, предназначенные для измерения трибометрическим устройством, рассматриваемым в настоящей работе, не должны находится на воздухе более 60 секунд (см. кривые 1, 2, 3, рис. 8). Простота конструкции трибометра и удобство его эксплуатации позволяют осуществить одно измерение за 15-20 секунд [5], что делает полученные результаты достоверными.

Заключение

В настоящей работе проведена оптимизация параметров и режимов работы устройства экспресс-контроля чистоты поверхности, реализующего метод трибометрического взаимодействия двух подложек. В результате оптимизации определены количественные значения параметров и режимы работы

устройства, при которых осуществляется прецизионное измерение чистоты поверхности подложек:

- угол наклона подложки-индентора к исследуемой поверхности не должен превышать 6° ($\alpha \leq 6^\circ$);
- угол наклона плоскости подложкодержателя исследуемой подложки (β) необходимо выбирать из интервала значений $50^\circ < \beta \leq 60^\circ$;
- подложки, предназначенные для измерения, не должны находиться в контакте с внешней средой более 60 секунд;
- при одинаковой длине пути подложка-индентор применяется для измерения чистоты поверхности по одной траектории не более трех раз, а по разным траекториям – не более одного раза, что обусловлено потерей исходных свойств поверхностью индентора.

Показано, что применение компьютерного анализа совместно с устройством экспресс-контроля допускает возможность многократного использования подложки-индентора при контроле чистоты всей площади поверхности подложек (а также поверхностей с разной степенью загрязнения) на основе компьютерного восстановления исходных свойств индентора. Полученные в работе результаты позволяют повысить качество контроля степени чистоты поверхности подложек и, как следствие, изготавливаемого дифракционного микрорельефа.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ, правительства Самарской области и Американского фонда гражданских исследований и развития (CRDF Project SA-014-02) в рамках российско-американской программы «Фундаментальные исследования и высшее образование» (BRHE), а также при поддержке гранта Президента РФ № НШ-1007.2003.01 и гранта РФФИ № 04-02-08094.

Литература

1. Моро У. Микролитография. Принципы, методы, материалы / Под ред. Р.Х. Тимерова. М.: Мир, 1990. Ч. 2. - 632 с.
2. Wayne M. Moreau. Semiconductor Lithography. Principles, Practices, and Materials. N.Y. and London, Plenum Press, 1988.
3. Методы компьютерной оптики / Под ред. В.А. Соифера. М.: Физматлит, 2000. - 688 с.
4. Полтавцев Ю.Г., Князев А.С. Технология обработки поверхности в микроэлектронике // Киев: Тэхника, 1990. - 192 с.
5. Волков А.В., Колпаков А.И. Способ определения чистоты поверхности подложек // А. с. № 1821688. Кл. G 01 N 13/02, 1993.
6. 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.
7. Колпаков В.А. Формирование оптического микрорельефа на диоксиде кремния в плазме газового разряда высоковольтного типа // Дис. ... канд. физ.-мат. наук. Самара, 2004.