

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
"САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ имени академика С.П. КОРОЛЕВА"

ИОННО-ПЛАЗМЕННАЯ ОЧИСТКА ПОВЕРХНОСТИ ПОДЛОЖЕК ОПТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

*Утверждено Редакционно-издательским советом
университета в качестве методических указаний
к лабораторной работе*

САМАРА
Издательство СГАУ
2008

УДК 621.38

Составитель В. А. Колпаков

Рецензент зав. каф. нанотехнологий, д-р физ.-мат. наук, доц. В.С. Павельев

Ионно-плазменная очистка поверхности подложек оптических материалов: метод. указания к лаб. работе / сост. В.А. Колпаков. – Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та. 2008. – 23 с.

В методических указаниях рассматриваются физические основы методов формирования технологически чистой поверхности, приводятся механизмы взаимодействия частиц плазмы с молекулами и атомами загрязнений на поверхности подложки, описания традиционного обораживания, используемого в ионно-плазменных технологиях, методики измерения чистоты подложек оптических материалов и ионно-плазменного травления органических загрязнений на их поверхности.

Работа выполнена на кафедре «Техническая кибернетика», предназначена для студентов магистерской подготовки по направлению 010600.68 «Прикладные математика и физика», магистерская программа «Оптические информационные технологии» и является частью цикла работ по курсу «Автоматизированные технологии дифракционной оптики».

© Самарский государственный
аэрокосмический университет,
2008

Цель работы: закрепление знаний в области физических основ ионно-плазменных технологий путем теоретического и экспериментального изучения механизмов формирования технологически чистой поверхности при ее взаимодействии с частицами низкотемпературной плазмы.

ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ ЗАДАНИЯ

1. По конспекту лекций, данным методическим указаниям и рекомендованной литературе изучить физические основы ионно-плазменной очистки поверхности подложек оптических материалов.
2. Подготовить ответы на контрольные вопросы.
3. Изучить порядок работы на вакуумной установке УВН-2М-1 и генераторе низкотемпературной плазмы.
4. Изучить принципы работы и основные характеристики измерителя чистоты – трибометра.
5. Выполнить экспериментальную часть лабораторной работы, необходимые расчеты и построение графиков для требуемых в работе зависимостей.
6. Провести анализ полученных результатов и сделать выводы.

Приборы и принадлежности: измеритель чистоты – трибометр, установка УВН-2М-1, генератор низкотемпературной плазмы, набор подложек.

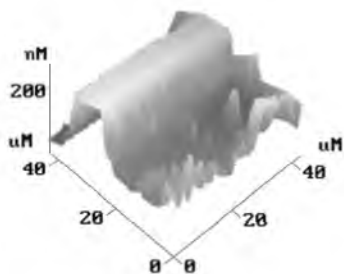
1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАБОТЫ

Тонкие пленки металлов широко используются в качестве маскирующих слоев в производствах элементов дифракционной оптики. Однако при практическом использовании таких пленок возникают проблемы адгезионной стойкости и структурных свойств границы раздела поверхность подложки-маскирующий слой. "Недостаточное качество этих свойств приводит" к значительному искажению формы дифракционного микрорельефа и, следовательно, к искажению параметров светового потока, фор-

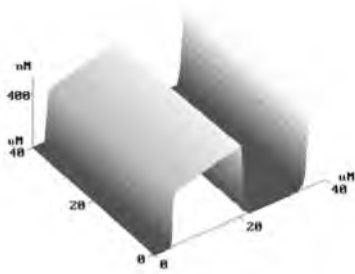
мируемого дифракционным элементом. Поэтому для исключения этого недостатка поверхность подложки проходит финишную очистку непосредственно перед нанесением маскирующего слоя.

Уменьшение размеров параметров дифракционных оптических элементов (ДОЭ) до субмикронных при одновременном увеличении аспектного отношения приводит к ужесточению требований к технологической чистоте поверхности подложек, т.к. при ширине полосок микропрофиля, равных долям микрона, частицы загрязнений на поверхности подложки становятся соизмеримыми с элементами топологии ДОЭ. В процессе травления эти загрязнения могут служить маскирующим слоем и существенно изменить скорость травления в области микрорельефа и этим исказить его геометрические параметры (рис.1,а). Таким образом, полное удаление органических загрязнений с поверхности подложки является необходимым условием формирования качественного микрорельефа ДОЭ (рис.1,б).

Различают физически и технологически чистые поверхности подложек. В первом случае на ее поверхности полностью отсутствуют чужеродные (примесные) атомы и молекулы и ее свойства определяют только разорванные связи поверхностных атомов материала подложки. Физико-химические свойства ювенильных поверхностей обладают необычными параметрами: характеристическими оптическими константами, собственными значениями контактных потенциалов, особыми химическими и каталитическими свойствами. Во втором случае концентрация примесных атомов и молекул настолько мала, что практически не оказывает влияния на процессы формирования или деградации параметров ДОЭ.



а



б

Рис. 1. Микрофотография микропрофиля на диоксиде кремния:
 а – дно которого имеет дефекты, обусловленные локальными загрязнениями поверхности подложки; б – полученного при формировании маскирующего слоя на технологически чистой поверхности

Непосредственно над ювенильной поверхностью подложки обычно находятся слои окислов, иных, чем сама подложка строения и свойств. Такие оксидные пленки обычно прочно связаны с подложкой, имеют различную толщину, достигающую нескольких десятков ангстрем, и отчасти проникают через устья микродефектов на внутреннюю поверхность подложки. Именно эту окисленную поверхность подложки мы получаем в результате обычных методов ее очистки (рис.2).

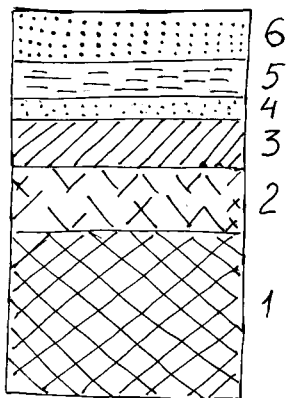


Рис. 2. Схема основных видов адсорбционных слоев на поверхности диэлектрической подложки:

1 – первичная объемная структура твердого тела; 2 – зона деформированного твердого тела; 3 – слой окислов; 4 – адсорбционный слой газов;
 5 – адсорбционный слой воды; 6 – адсорбционный слой полярных и неполярных молекул органического вещества

На поверхности окисленного слоя, в зависимости от условий, в которых находится подложка, могут присутствовать:

1. **Антропогенные загрязнения**, являющиеся продуктами жизнедеятельности человека, могут быть полностью устранены более совершенной организацией проведения технологических

процессов, а также широким внедрением промышленных роботов и автоматизированных линий.

2. Производственные источники загрязнений многообразны и приводят к появлению на рабочих поверхностях подложек реакционных адсорбционных слоев, а также макроскопических загрязнений, видимых непосредственно или в отраженном свете, или при небольшом увеличении.

Реакционные адсорбционные слои – оксиды, нитриды, карбиды, галогениды и другие образуются при химическом взаимодействии поверхности с атомами загрязнений. Образование загрязнений является следствием адсорбции примесей из окружающей среды во время технологического процесса. Их подразделяют на ионные, атомные и молекулярные.

Ионные адсорбционные слои образуются при проведении процессов фотолитографии, удаления реакционных слоев травлением с последующей промывкой в деионизованной или дистиллированной водах.

Атомные загрязнения представляют собой атомы используемых материалов, технологической оснастки и стенок рабочей камеры. Чаще всего на поверхности подложек адсорбируются атомы Na, Al, Cu, Au и т.д.

Молекулярные адсорбционные слои – органические пленки или макроскопические частицы, имеющие молекулярное строение: парафины, смолы, масла, соли органических кислот, вода. Они связаны с поверхностью подложки ван-дер-ваальсовыми силами. Органические загрязнения придают поверхности подложек гидрофобные свойства, которые препятствуют проведению очистки от ионных и атомных адсорбционных слоев.

Загрязнения твердыми частицами. Этот вид загрязнений представляет собой макроскопические частицы различной природы (пылинки, соринки, волокна и т.д.), образующиеся на поверхности подложки в результате целого ряда процессов. К ним относятся резка, шлифовка, полировка подложек, износ оснастки оборудования, проникновение атмосферной пыли вследствие недостаточной фильтрации воздуха, истирание фотошаблонов и некачественное удаление фоторезиста, недостаточная эффектив-

ность фильтрации жидких реактивов и деионизованной воды при выполнении операций изготовления ДОЭ.

Эти частицы являются причинами случайных дефектов, таких как проколы маскирующего слоя при травлении, непротравленные пятна (см. рис.1,а), подтравливание под маскирующим слоем и т.д.

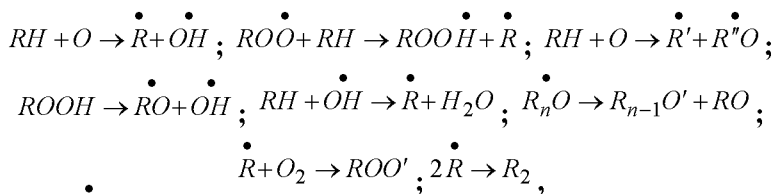
Размеры твердых частиц (например, частиц пыли) по порядку величины имеют тот же размер, что и слои, формируемые на поверхности подложек согласно топологической схеме маскирующего слоя ДОЭ, что усугубляет их негативное воздействие.

Поскольку технологический процесс изготовления (травление и нанесения покрытия) протекает в помещении класса чистоты 100, то загрязнение пылью осуществляется в результате проведения самого технологического процесса.

Загрязнение углеводородами поверхности подложки осуществляется при работе механических насосов, пары масла которого по вакуумным трубам проникают в объем рабочей камеры вакуумной установки. Даже использование высококачественных масел с пониженным давлением паров не дает полной гарантии отсутствия легких углеводородов в атмосфере остаточных газов рабочей камеры, т.к. при работе даже одноступенчатого насоса величина обратного потока паров масла в первые 30 мин после запуска может превышать 10^{-2} мг/(см² · мин), уменьшаясь примерно в 3 раза в установившемся режиме.

Источником органических загрязнений также являются пары рабочей жидкости, проникающие из диффузионного насоса. При использовании в диффузионном насосе масла ВМ-1 величина его обратного потока составляет 0,5 мг/(см² · ч).

Применение различного рода ловушек (N, He) хотя и позволяет снизить попадание масла в рабочую камеру, но не устраняет полностью присутствие органических загрязнений. Их влияние проявляется при дальнейшем технологическом процессе (напыление пленок, металлизация) путем окисления загрязнений на поверхности подложки по цепной реакции, протекающей по следующей схеме:



где R и R' – фрагменты и радикалы молекул органических загрязнений; R'' – радикалы, производные от R , образующиеся в процессе разложения молекул загрязнений. В результате реакций подобного рода происходят разложение пленки органических загрязнений на отдельные фрагменты с небольшой молекулярной массой и последующее окисление этих фрагментов с образованием газообразных соединений CO , CO_2 , а также паров воды H_2O .

Поскольку этот вид органических загрязнений практически неустраним, то загрязнения парами вакуумного масла являются основными при производстве ДОЭ.

Традиционная жидкостная химическая очистка подложек перед нанесением маскирующего слоя является первой (грубой) стадией очистки. Такая обработка подложки не позволяет полностью удалить все загрязнения с ее поверхности, т. к. кислотные или щелочные остатки сами являются загрязнениями. Из этого следует, что жидкостная химическая очистка в принципе не в состоянии сформировать поверхность с параметрами, близкими к физической чистоте.

Для достижения ювенильной чистоты поверхности подложек необходимо использовать технологические инструменты, значительно превосходящие в основе своей требуемую степень их чистоты. Такими свойствами в настоящее время обладают потоки частиц низкотемпературной плазмы, формируемые газоразрядными приборами. К другим достоинствам ионно-плазменных технологий следует отнести возможность проведения финишной очистки в условиях вакуума непосредственно перед процессом нанесения маскирующего слоя. Это позволяет получать высокоплотные, прочно сцепляющиеся с поверхностью подложек пленки маскирующих материалов.

Механизм ионно-химического травления загрязнений отличается тем, что нейтральные молекулы NO , N_2O , NO_2 , N_2 , O_2

являются источниками образования химически активных радикалов кислорода.

Таким образом, в плазменных технологиях, кроме механизма ионно-химического травления (ИХТ), удаление загрязнений будет происходить и за счет механизмов ионно-стимулированного травления (ИСТ) и электронно-стимулированного радикального травления (ЭСТ). Тогда основными процессами взаимодействия низкотемпературной плазмы с поверхностью подложки, приводящими к удалению органических загрязнений, являются следующие:

- физическое распыление отрицательными ионами кислорода;
- химическое травление отрицательными ионами кислорода;
- химическое травление радикалами кислорода, образованными за счет диссоциации нейтральных молекул вследствие их ионной бомбардировки отрицательными ионами кислорода;
- химическое травление радикалами кислорода, образованными за счет диссоциации нейтральных молекул вследствие их электронного удара.

При облучении углеводородов потоками плазмы они способны к полимеризации, скорость которой пропорциональна температуре данного процесса. При полимеризации происходят объединение молекул органических загрязнений в длинные цепи и их сшивание между собой, приводящее к замедлению процесса очистки из-за упрочнения межмолекулярных связей. Наиболее эффективно полимеризация начинает протекать при температурах 400 К и выше. При температурах же процесса 360 К и менее скорость полимеризации не превышает 0,96 %/ч, следовательно, процессами полимеризации в настоящей работе можно пренебречь. Тогда суммарную скорость удаления загрязнений и величину их концентрации можно определить из равенств:

$$V_{et} = \frac{BM}{\rho N_A} \left[\frac{(k_1 + k_3^C + k_3^H) \exp\left(\frac{U - U_{gr}}{U}\right) - |J_i^-| + }{+ k_i^* k_1 J_i^- + k_e^* k_1 J_e} \right] \theta. \quad (1)$$

$$C_d = \rho h - \frac{BM}{N_A} \left[\frac{(k_1 + k_3^C + k_3^H) \exp\left(\frac{U - U_{gr}}{U}\right) - 1}{k_i^* k_1 Z(1 - Y) + k_e^* k_1 Y} \left(Z(1 - Y) + \right) \right] \quad (2)$$

$$\Sigma_{\ominus} Z I_n^2 (1 - Y) t,$$

где Z – параметр конструкции ВПП, рассчитываемый по формуле:

$$Z = \left(1 - \frac{d}{d_{\max}} \right) \frac{1}{qeS_K}; \quad (3)$$

Y – обобщенный коэффициент плазменного потока, рассчитываемый по формуле:

$$Y = \frac{\gamma_e \eta}{(1 + \gamma_e)} \exp[(\alpha - \alpha_n) d_{\max}]; \quad (4)$$

Σ_{\ominus} – обобщенный параметр степени заполнения поверхности активными частицами, рассчитываемый по формуле:

$$\Sigma_{\ominus} = \frac{1}{1 + \frac{(k_1 + k_2^{NO})}{s_a J_n^{NO}}} + \frac{1}{1 + \frac{(k_1 + k_2^{NO_2})}{s_a J_n^{NO_2}}} + \frac{1}{1 + \frac{(k_1 + k_2^{N_2O})}{s_a J_n^{N_2O}}} + \frac{1}{1 + \frac{(k_1 + k_2^{O_2})}{s_a J_n^{O_2}}}. \quad (5)$$

Таким образом, при взаимодействии низкотемпературной плазмы с поверхностью оптических материалов возможна диссоциация молекул органических загрязнений по механизмам ПХТ, ИХТ, ИСТ, ЭСТ и физического распыления.

Бомбардировка поверхности подложки электронами, наряду с очисткой, может привести к росту концентрации структурных дефектов при обработке монокристаллических подложек (рис.2, позиция 2).

Режим ионно-плазменной очистки должен обеспечивать условия преобладания процесса распыления загрязнений над про-

цессом их адсорбции к поверхности подложки. Эффективное выполнение этих условий возможно, если отношение потоков ионов и тепловых молекул остаточного газа на поверхность подложки лежит в пределах 100 :1.

В качестве рабочих газов для очистки используются инертные газы, кислород, воздух и смеси этих газов. Выбор газа для очистки определяется материалом подложки и видом поверхностных загрязнений. Так, например, неорганические загрязнения удаляются в основном физическим распылением ионами аргона, а органические – обработкой в плазме кислорода.

2. УСТРОЙСТВА И ОБОРУДОВАНИЕ ИОННО-ПЛАЗМЕННОЙ ОЧИСТКИ

По конструктивным признакам все устройства ионно-плазменной очистки подразделяются на диодные и триодные системы. На рис. 3 представлены схемы наиболее применяемых устройств ионно-плазменной очистки на постоянном токе.

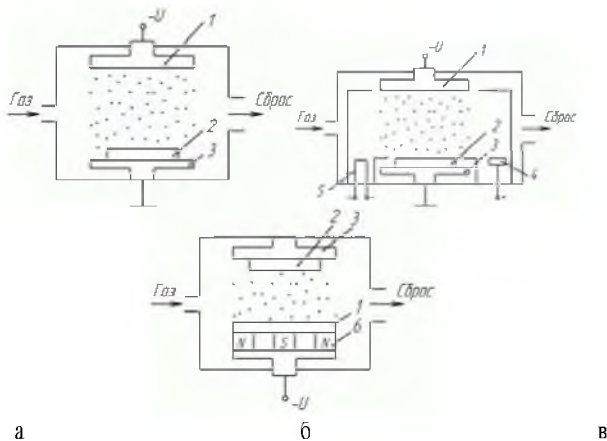


Рис. 3. Схемы устройств ионно-плазменной очистки поверхностей подложек:

- а – устройство катодного распыления; б – триодная система;
 в – устройство магнетронного распыления; 1 – катод; 2 – подложка;

3 – анод; 4 – дополнительный анод; 5 – термокатод;
6 – постоянный магнит

Диодная система распыления на постоянном токе (катодное распыление) позволяет обрабатывать проводящие поверхности при давлении газа $5 \cdot 10^{-1}$ - $1 \cdot 10^1$ Па. При наложении на область низкотемпературной плазмы магнитного поля рабочее давление может быть уменьшено до $1 \cdot 10^{-1}$ Па.

Триодная система распыления позволяет проводить процесс распыления при еще более низких давлениях $(5-6) \cdot 10^{-2}$ Па. Снижение давления достигается введением дополнительных термокатада и анода, между которыми зажигается электрический разряд. Поток плазмы, создаваемый этим разрядом, инжектируется в зону распыления. При подаче на катод высокого отрицательного потенциала происходят отбор и ускорение ионов из плазмы, а также распыление загрязняющих поверхность подложек примесей при их расположении на катоде. Формированию плазменного потока заданной формы способствует магнитное поле.

Основным недостатком этих систем является невозможность очистки поверхности диэлектрических подложек из-за трудности подачи на подложку потенциала и образования на ее поверхности устойчивого заряда, одинакового по знаку с заряженными частицами плазмы.

Для очистки диэлектриков используются разнообразные устройства высокочастотного распыления с емкостным или индуктивным возбуждением электрического разряда. ВЧ-потенциал с частотой 13,56 МГц прикладывается между катодом и заземленным анодом. В переменном электрическом поле происходит осцилляция электронов. При столкновении с молекулами или атомами газа возникает процесс их ионизации. Электроны, обладая по сравнению с ионами более высокой подвижностью, создают на поверхности отрицательный заряд самосмещения. Потенциал этого заряда ускоряет ионы, и в результате их столкновения с подложкой происходит распыление загрязнений, имеющихся на ее поверхности.

Постоянные магниты на обратной стороне катода формируют на рабочей стороне замкнутое магнитное поле, перпендику-

лярно направленное электрическому полю между анодом и катодом. Высокие скорости распыления загрязнений в магнетроне определяются высокой эффективностью захвата электронов в скрещенных электрическом и магнитном полях вблизи поверхности обрабатываемой подложки.

Все устройства очистки поверхности подложек путем плазмо-химического травления (ПХТ) можно условно разделить на два класса: объемные и планарные системы. Подложки в этих системах располагаются на катоде, и процесс травления стимулируется ионной бомбардировкой. На рис. 4 представлены схемы устройств для этих систем.

Объемные системы ПХТ используются в основном для очистки остатков фоторезистивной маски после выполнения ею своих функций. В оборудовании в этом случае используется групповая технология, т. к. не требуется прецизионность обработки. Разряд зажигается в реакторе при подаче ВЧ-напряжения на обкладки конденсатора или индуктор, охватывающий реактор. Основной проблемой при этом является обеспечение равномерности травления и снижения тепловых нагрузок на подложки. Технически это достигается распределением газа, подаваемого в реактор, предварительным смешиванием газов для получения рабочей смеси, введением перфорированного металлического цилиндра, ограничивающего зону размещения подложек. На практике перфорированный цилиндр выполняется из анодированного алюминия, что обеспечивает температуру подложки не более 422 К.

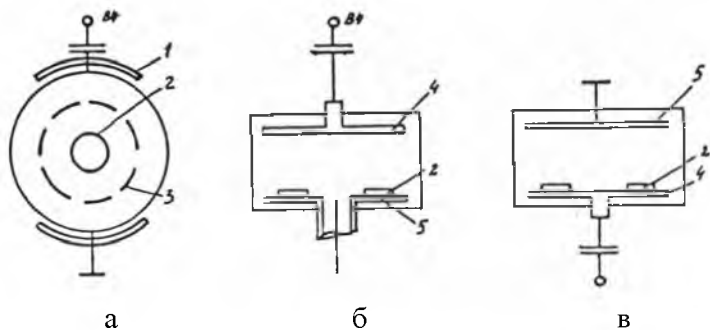


Рис. 4. Схемы устройств ПХТ материалов:

а – объемная система; б – планарная система с загружаемым анодом;
в – планарная система с загружаемым катодом; 1 – электрод возбуждения; 2 – подложки; 3 – перфорированный экран; 4 – катод; 5 – анод

Планарные системы осуществляют ПХТ в условиях, когда на подложках создается отрицательный (положительный) относительно плазмы электрический потенциал, отбирающий и ускоряющий ионы из плазмы по направлению к поверхности обрабатываемой подложки.

В случае ПХТ в ВЧ-разряде существуют два способа подачи потенциала на подложки. Первый заключается в размещении подложки на электроде, имеющем площадь много меньшую площади поверхности окружающих заземленных поверхностей технологической оснастки и стенок рабочей камеры. При подаче ВЧ-напряжения между подложкой и плазмой возникает постоянное смещение, равное половине пикового напряжения, а между плазмой и стенками рабочей камеры оно в это же время не превышает нескольких вольт. В большинстве реальных случаев смещение на поверхности подложки может достигать 200 – 500 В.

Второй способ состоит в размещении подложек на заземленном держателе и увеличении потенциала плазмы относительно земли, который удерживает ее между двумя близко расположенными электродами. В этом случае потенциал плазмы относительно поверхности подложек может достигать нескольких сотен вольт.

Установки для ПХТ автоматизированы. Контроль и регулировка технологического режима осуществляются в таких установках по пяти основным параметрам: составу реактивного газа; скорости подачи его в рабочий объем; величине мощности, вкладываемой в разряд; давлению рабочего газа в рабочей камере; сигналу датчика контроля протравливания пленок.

Технический уровень оборудования для плазмохимической обработки должен обеспечивать высокие однородность пространственного распределения плотности создаваемой плазмы, воспроизводимость и стабильность горения разряда при относительно низких давлениях газа и мощности, потребляемой элект-

трическим разрядом, скорости непрерывной подачи газа к обрабатываемой подложке и отвод продуктов питания.

3. ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

Лабораторная установка содержит устройство контроля чистоты поверхности подложек (трибометр), набор подложек, вакуумную установку УВН-2М-1 с ионно-плазменной очисткой и вспомогательные материалы следующего типа: батистовый материал, пинцет с диэлектрическими наконечниками, резиновые напалечники, а также инструкции, описывающие порядок выполнения работ на трибометре и ионно-плазменной установке.

3.1. МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ КРИТЕРИЯ ОЦЕНКИ МОМЕНТА ДОСТИЖЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИ ЧИСТОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Для получения воспроизводимых результатов измерений и их перевода в значения концентрации загрязнений необходимо аналитически связать численные значения коэффициента трения скольжения μ с углами α , β и установить их связь с измеряемой величиной τ и концентрацией загрязнений на поверхности подложки. Для решения этой задачи рассмотрим схему расположения сил, возникающих при взаимодействии подложек (рис. 5).

Баланс этих сил в системе можно описать равенством вида

$$\vec{N} + \vec{F}_{TP} + m\vec{g} = m\vec{a}, \quad (6)$$

где $m\vec{g}$ – сила тяжести, под действием которой происходит движение; \vec{N} – сила реакции опоры; $\vec{F}_{TP} = N\mu$ – сила трения скольжения; N – сила нормального давления подложки-зонда на исследуемую поверхность; μ – коэффициент трения скольжения; $m\vec{a}$ – сила, движущая подложку-зонд.

Решая (6) относительно μ , получим выражение вида

$$\begin{aligned} \mu &= \frac{g \cos[90 - (\alpha + \beta)] - \alpha \cos \beta - g \cos \alpha \sin \beta}{g \cos \alpha \cos \beta} & (7) \\ &= \frac{\cos[90 + (\alpha + \beta)]}{\cos \alpha \cos \beta} - \frac{\alpha}{g \cos \alpha} - \operatorname{tg} \beta \end{aligned}$$

Анализ (7) показывает, что в рабочем диапазоне углов α и β всегда можно найти конкретное значение угла α при котором подложка-зонд в случае технологически чистой поверхности перестает скользить, т.к. выполняется равенство

$$\mu = \mu_{mp.n}, \quad (8)$$

где $\mu_{mp.n}$ – коэффициент трения покоя.

Это позволяет принимать численное значение $\mu_{mp.n}$ в качестве критерия оценки момента достижения технологической чистоты поверхности подложек, т.е. осуществлять калибровку параметров прибора по табличным значениям $\mu_{mp.n}$. Например, для диоксида кремния с технологически чистой поверхностью коэффициент трения покоя равен 1 [78], тогда (7) при $\beta=6^\circ$ принимает простой вид $\operatorname{tg} \alpha = 1$. Из этого равенства следует, что для диоксида кремния выполнение условия (8) достигается при $\alpha=45^\circ$. Для других материалов момент достижения технологической чистоты определяют аналогичным способом, подставляя в (7) соответствующие значения $\mu_{mp.n}$ и β .

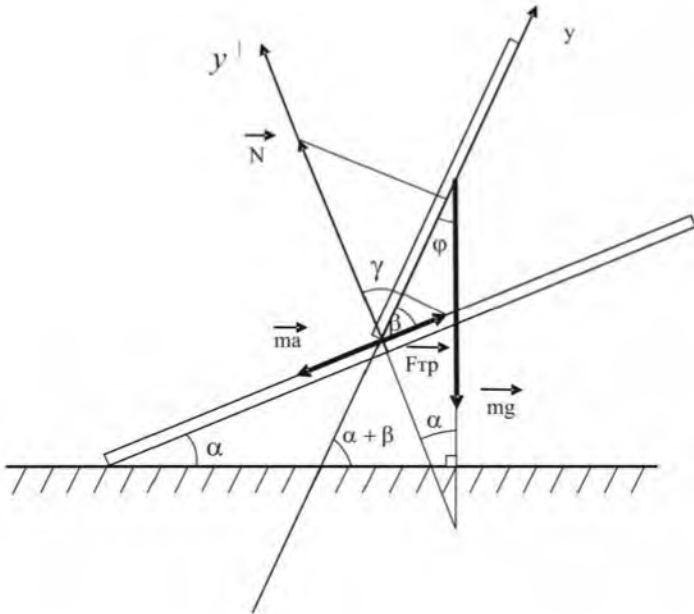


Рис. 5. Расположение сил, возникающих при взаимодействии подложек: α – угол, который исследуемая подложка составляет с горизонтом; β – угол между поверхностями взаимодействующих подложек

Перевод относительных значений скорости скольжения в значения поверхностной концентрации органических загрязнений C_d , измеряемой в $\text{г}/\text{см}^2$, можно осуществлять используя выражение:

$$C_d = (1 - V_{sl}) C_{d\min} + C_{d\max} V_{sl} = \left(1 - \frac{\tau_0}{\tau}\right) C_{d\min} + C_{d\max} \frac{\tau_0}{\tau}, \quad (9)$$

где τ , τ_0 – соответственно значение длительности измеряемого импульса, на выходе трибометра и значение длительности импульса, характерного для подложки с поверхностью, покрытой мономолекулярной пленкой загрязнений.

Таким образом, предлагаемая методика трибометрического измерения чистоты поверхности подложек позволяет исключить

из процесса калибровки параметров прибора использование поверхностей с эталонными свойствами.

3.2. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ ИЗМЕРЕНИЙ НА ТРИБОМЕТРЕ

Существующие методы контроля чистоты поверхности подложек основаны на использовании эффектов смачиваемости и трения покоя, требуют применения жидкостей или зондов со специальными свойствами, значительно усложняющими их использование непосредственно в технологическом процессе без разрушения свойств поверхности исследуемых подложек.

Методы трибологии позволяют измерять чистоту поверхности подложек в диапазоне 10^{-8} - 10^{-9} г/см², что соответствует технологически чистым поверхностям. Устройство, реализующее этот способ, представлено на рис.6.

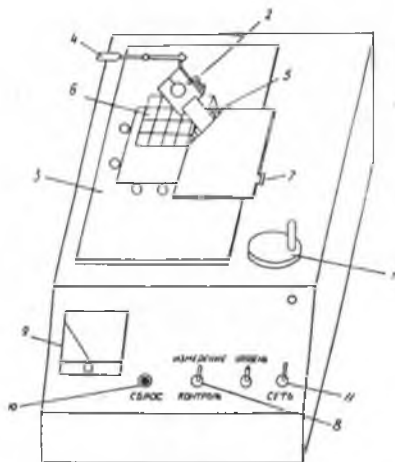


Рис. 6. Схема устройства трибометра:

- 1 – ручка; 2 – фиксатор держателя зонда; 3 – столлик подложкодержателя; 4 – фиксатор зонда; 5 – подложка-зонд; 5 – контролируемая подложка; 7 – фиксатор подложки зонда; 8 – тумблер "Контроль-измерения"; 9 – миллиамперметр; 10 – кнопка "Сброс"; 11 – тумблер "Сеть"

1. Установить тумблер "Контроль-измерение" в положение "Контроль".
2. Включить тумблер "Сеть".
3. С помощью ручки 1 (рис. 6) установить относительно горизонтали угол наклона столика, соответствующий показанию миллиамперметра 0,4 мА.
4. Установить держатель зонда в верхнее положение, укрепив фиксатором 2.
5. Надеть напалечники, установить подложку- зонд в держатель зонда, зафиксировать ее винтом. Установить контролируемую подложку на столик 3 подложкодержателя.
6. Отвести держатель зонда в исходное положение, закрепив фиксатором 4. Опустить зонд на контролируемую подложку.
7. Тумблер "Контроль-измерение" установить в положение "Изм."
8. Нажав кнопку "Сброс", добиться нулевых показаний на миллиамперметре.
9. Нажать фиксатор 4, записать показания миллиамперметра.
10. Снять подложки и положить их в чашку Петри.
11. При необходимости повторить пп. 5-10.
12. Тумблер "Сеть" установить в положение "Выкл."
13. С помощью ручки 1 опустить столик.
14. Держатель зонда опустить на столик.
15. Сдать рабочее место лаборанту.

3.3. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТ НА ИОННО-ПЛАЗМЕННОЙ УСТАНОВКЕ

1. Проконтролировать, чтобы все тумблеры на установке УВН-2М-1 были в положении «ВЫКЛ», ручка линейного автотрансформатора была в нулевом положении и все элементы технологического процесса имели исправные заземления (вакуумная установка УВН-2М-1, блок питания БП-150, линейный автотрансформатор).
2. Включить тумблер "Сеть" установки УВН-2М-1 в поло-

- жение «ВКЛ».
3. Нажать кнопку гидропривода "Вверх", поднять колпак.
 4. Надеть напалечники.
 5. Взять подложки из чашки Петри и установить их на подложкодержатели.
 6. Подложкодержатели установить на карусель вакуумной установки.
 7. Протереть хлопчатобумажной тканью, смоченной спиртом, поверхность дна рабочей камеры и резиновую прокладку колпака.
 8. Опустить колпак, нажав кнопку гидропривода «Вниз».
 9. Тумблер механического насоса поставить в положение «Вкл».
 10. Открыть верхний клапан для откачки из рабочей камеры, откачать ее до давления 53 Па. Контроль вести по прибору ВИТ-2.
 - 11 В присутствии лаборанта установить тумблер "Сеть" блока питания БП-150 в положение «ВКЛ».
 12. По указанию лаборанта с помощью ручки линейного автотрансформатора установить на блоке питания требуемые для очистки ток и напряжение ионно-плазменной установки. Контроль вести с помощью индикатора на блоке питания БП-150 при соответствующем положении тумблера «Измерение».
 13. Проконтролировать разряд ионно-плазменного источника. Должен быть ровный разряд, на индикаторе блока питания БП-150 при изменении тока не должно быть резких скачков тока. При наличии резких скачков тока блок питания выключить, позвать преподавателя.
 14. С помощью ручки «Карусель» установить соответствующий подложкодержатель над генератором низкотемпературной плазмы.
 15. Открыть заслонку на требуемое для очистки время (по указанию лаборанта).
 16. Закрыть заслонку. Выключить тумблер "Сеть" блока питания БП-150.
 17. С помощью ручки "Карусель" установить следующий подложкодержатель над генератором низкотемпературной плазмы.

18. Включить тумблер "Сеть" блока питания БП-150 и по указанию лаборанта установить требуемое для очистки напряжение и ток генератора низкотемпературной плазмы.
19. Повторить п. 15.
20. По окончании очистки всех подложек выключить тумблер «Сеть» блока питания БП-150. Ручку линейного трансформатора установить в нулевое положение.
21. Закрыть верхнюю ручку клапанной коробки.
22. Выключить механический насос.
23. Напустить воздух в вакуум-провод механического насоса, установив тумблер «Натекатель» в положение «Вкл».
24. Поднять колпак. Снять подложки с подложкодержателей. Положить в чашку Петри. Опустить колпак.
25. Выключить тумблер "Сеть" вакуумной установки УВН-2М-1.
26. Сдать рабочее место лаборанту.

4. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Изучить порядок выполнения работы на трибометре.
2. Приобрести навыки работы с подложками, т.е. надеть напалечники и не менее 5 раз установить и снять подложки с подложкодержателя трибометра.
3. Измерить исходную чистоту поверхности подложек и записать показания в рабочую тетрадь.
4. Изучить порядок выполнения работ на ионно-плазменной установке.
5. Установить подложки с измеренной степенью чистоты поверхности в подложкодержатели ионно-плазменной установки.
6. Осуществить очистку поверхности подложек, изменяя по указанию лаборанта длительность облучения, ускоряющее напряжение, ток ионно-плазменного потока или другие параметры.
7. Построить графики зависимостей.

5. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Отчет выполняется на листах формата А4 и начинается с титульного листа .
2. Цель работы.
3. Общие требования к выполнению задания.
4. Перечень приборов, используемых в эксперименте.
5. Блок-схема лабораторного стенда.
6. Таблицы измеренных и расчетных величин и графические зависимости.
7. Выводы с кратким изложением физических основ механизмов очистки поверхности подложки.

5. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое технологически чистая поверхность и абсолютно чистая поверхность?
2. Какие способы очистки поверхности подложек вы знаете? Их достоинства и недостатки.
3. Перечислить механизмы ионно-плазменной очистки.
4. Назвать типы устройств ионно-плазменной очистки. Их достоинства и недостатки.
5. Каким образом площадь электрода, на котором размещаются подложки, влияет на величину и тип заряда на поверхности подложки?
6. Дать понятие технологического процесса.
7. Дать классификацию технологического уровня оборудования.
8. Дать характеристику схем ионно-плазменного оборудования.
9. Выбор рабочего газа для очистки подложек от органических загрязнений.
10. Технологические ограничения метода "жидкостной" очистки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Методы компьютерной оптики / под ред. В.А. Соифера. – М.: Физматлит, 2000. - 688 с.
2. Полтавцев, Ю.Г. Технология обработки поверхностей в микроэлектронике / Ю.Г. Полтавцев, А.С. Князев. – Киев: Техника, 1990. – С.192-196.
3. Курносов, А.И. Технология производства полупроводниковых приборов / А.И. Курносов, В.В. Юдин. – М.: Высшая школа, 1974.

Учебное издание

**ИОННО-ПЛАЗМЕННАЯ ОЧИСТКА ПОВЕРХНОСТИ
ПОДЛОЖЕК ОПТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ**

Методические указания к лабораторной работе

Составитель *Колтаков Всеволод Анатольевич*

Редактор Т. И. Кузнецова
Компьютерная верстка О. А. Ананьев

Подписано в печать 29.05.2008 г. Формат 60x84 1/16.

Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 1,5 Тираж 100 экз.

Заказ Арт. С-76/2008

Самарский государственный аэрокосмический
университет имени академика С.П. Королева
443086, Самара, Московское шоссе, 34

Издательство Самарского государственного
аэрокосмического университета.
443086, Самара, Московское шоссе, 34.