

На правах рукописи

КРИЧЕВСКИЙ Сергей Васильевич

РАЗРАБОТКА ПРИБОРОВ АНАЛИЗА И ПОВЫШЕНИЯ СТЕПЕНИ
ЧИСТОТЫ ПОВЕРХНОСТИ ДИОКСИДА КРЕМНИЯ

Специальность

01.04.01 – «Приборы и методы экспериментальной физики»

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

САМАРА – 2008

Работа выполнена в Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева» (СГАУ) и Институте систем обработки изображений РАН

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук, доцент
Колпаков Всеволод Анатольевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Комов Александр Николаевич

кандидат технических наук
Пияков Алексей Владимирович

Ведущая организация: Федеральный научно-производственный центр
Федеральное государственное унитарное
предприятие "Научно-исследовательский институт
физических измерений" (г. Пенза)

Защита состоится «24» декабря 2008 г. в 10 часов на заседании диссертационного совета Д 212.215.01 в СГАУ по адресу:
443086, Самара, Московское шоссе, 34.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке СГАУ.

Автореферат разослан « 19 » ноября 2008 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
профессор

В.Г. Шахов

Общая характеристика работы.

Диссертация посвящена созданию методов и приборов анализа степени чистоты поверхности диоксида кремния и ее повышения в плазме высоковольтного газового разряда.

Актуальность проблемы. Диоксид кремния – материал, широко используемый для создания элементов микроэлектроники и дифракционной оптики. Технология изготовления таких элементов требует высокой прецизионности параметров чистоты поверхности подложек, т.к. даже незначительное их отклонение способно привести к существенному искажению величины адгезии маскирующих слоев, появлению горизонтальной составляющей скорости травления микропрофиля.

Ионно-плазменная очистка поверхности подложек от органических загрязнений низкотемпературной плазмой высокочастотного (ВЧ), сверхвысокочастотного (СВЧ), магнетронного, тлеющего и др. типов разрядов, подробно рассмотренная в работах Орликовского А.А. (1985), Рябый В.А. (1986 г.), Данилина Б.С. (1987 г.), Kaufman H.R. (1991 г.), Моисеева О.Ю. (2000 г.), Волкова А.В. (2002 г.), Фареника В.И. (2004 г.), Кагадея В.А. (2005 г.), Рязанцева С.С. (2006 г.), показала наличие проблем: обеспечения подавления неустойчивости плазмы; применения сложных систем при генерации широкоформатных потоков плазмы с равномерным распределением частиц по их сечению; удержания быстрых электронов в широкоапертурном полом катоде и генерации эмитирующей ионы плазмы в анодной полости. Перечисленные задачи решены Sittsworth J.A., Wendt A.E. (1996 г.), Uedo Yoko, Muta Hiroshi, Kawai Yoshinobu (1999 г.), Korzec D., Werner F., Winter R. (1996 г.), путем увеличения конструктивной сложности и энергоемкости генераторов низкотемпературной плазмы. Однако это не позволило устранить общий для них недостаток - эффект загрузки. Таким образом, сохраняется потребность в приборе и методе формирования потоков плазмы с равномерным распределением частиц по их сечению и независимыми от обрабатываемой поверхности параметрами.

Анализ работ Вагнера И.В. (1972 г.), Комова А.Н. (1984 г.) показывает, что для финишной очистки поверхности подложек наиболее целесообразно использовать низкотемпературную плазму, получаемую высоковольтным газовым разрядом (ВГР). В данном случае с поверхностью подложки взаимодействуют только отрицательно заряженные частицы, плазма формируется в виде направленного потока за пределами электродов, что позволяет устранить эффект загрузки, упростить конструкцию и условия эксплуатации прибора. В процессе эксплуатации прибора обнаружено, что его конструкция не обеспечивает стабильности параметров высоковольтного

разряда. Причиной нестабильности являются электрический пробой в системах катод – анод, высоковольтные кабель и ввод электропитания.

С другой стороны, решение задачи получения технологически чистой поверхности связано с необходимостью использования методов и приборов экспресс-контроля чистоты поверхности подложек. В работах Перескоковой А.П. (1979 г.), Полтавцева Ю.Г. (1990 г.), Волкова А.В. (1992 г.), Колпакова А.И. (1993 г.), Моисеева О.Ю. (2000 г.), Бородина С.А. (2006 г.) приведены описания приборов и методов, требующих применения в процессе измерения специальной технологической операции очистки поверхности зонда-индентора, а для калибровки параметров прибора - подложек с эталонным загрязнением поверхности. К недостаткам перечисленных методов следует отнести возможность проведения измерения только конкретного типа загрязнений на исследуемой поверхности, ее загрязнение в процессе контроля, нестабильность показаний приборов. Следовательно, существует проблема создания прибора и метода неразрушающего экспресс-контроля чистоты поверхности, не требующих специальных операций калибровки прибора и очистки поверхности зонда-индентора.

Таким образом, в отечественной и зарубежной литературе отсутствуют сведения о результатах теоретических и экспериментальных исследований, позволяющих устранить проблему нестабильности параметров высоковольтного газоразрядного прибора (ВГП), механизмах взаимодействия частиц плазмы ВГР с поверхностью диэлектрических подложек, покрытой органическими загрязнениями; методах, приборах очистки и экспресс-контроля чистоты поверхности подложек, свободных от вышеперечисленных недостатков.

Цель и задачи работы. Целью настоящей работы является создание методов анализа и формирования технологически чистой поверхности диоксида кремния на основе модификации приборов: формирующего высоковольтный газовый разряд и обеспечивающего неразрушающий экспресс-контроль чистоты поверхности подложек.

В соответствии с поставленной целью определены и **основные задачи диссертации**, а именно:

1. Создание модифицированного прибора, формирующего широкоапертурный поток плазмы высоковольтным газовым разрядом для решения задач очистки поверхности диоксида кремния.
2. Создание метода и прибора, обеспечивающих неразрушающий экспресс-контроль чистоты поверхности подложек.
3. Разработка метода оценки концентрации органических загрязнений на поверхности диоксида кремния при их взаимодействии с частицами плазмы высоковольтного газового разряда (ПВГР).

4. Экспериментальное исследование зависимости поверхностной концентрации органических загрязнений от физических факторов процесса очистки в ПВГР.
5. Разработка метода финишной очистки поверхности диоксида кремния широкоапертурным потоком ПВГР.

Научная новизна. При выполнении настоящей диссертационной работы впервые:

1. Предложен метод оценки чистоты поверхности подложки на основе связи концентрации органических загрязнений на поверхности диоксида кремния с параметрами работы высоковольтного газоразрядного прибора (ускоряющим напряжением, током разряда, длительностью процесса очистки).
2. Экспериментально исследованы зависимости остаточной концентрации органических загрязнений на поверхности диоксида кремния от физических факторов процесса очистки: ускоряющего напряжения $0,3 \leq U \leq 5$ кВ, тока разряда $0,2 \leq I \leq 3$ мА, длительности процесса очистки $0 < t \leq 180$ с.
3. Обнаружена связь коэффициентов трения скольжения и покоя для технологически чистой поверхности, на основе которой разработаны метод и прибор неразрушающего экспресс-контроля чистоты поверхности подложек.
4. Экспериментально исследованы механизмы трибометрического взаимодействия подложек диоксида кремния, определены рабочие диапазоны параметров прибора: угла между подложками $\beta = 4^{\circ} - 6^{\circ}$, угла между исследуемой поверхностью и горизонтальной плоскостью $\alpha = 30^{\circ} - 60^{\circ}$.

Практическая ценность результатов работы определяется следующим:

1. Предложен модифицированный прибор, обеспечивающий стабильность параметров высоковольтного газового разряда, за счет введения в его конструктивные узлы эффективных элементов защиты от высоковольтного пробоя: в систему анод-катод – фторопластовой прокладки с проточкой, проточки в изолятор катода, заливаемой диэлектрической жидкостью; высоковольтного кабеля с изолирующей оболочкой, стабилизирующими дисками, разделительными элементами, залитыми вакуумностойкой диэлектрической жидкостью.
2. Определены скорости травления органических загрязнений на поверхности диоксида кремния в ПВГР для соответствующих значений параметров технологического процесса.

3. Предложен метод формирования технологически чистой поверхности диоксида кремния в ПВГР: ускоряющее напряжение $U=1,2$ кВ; ток разряда $I=3$ mA; длительность процесса очистки $t=10$ с.
4. Разработан трибометрический прибор неразрушающего экспресс-контроля чистоты поверхности подложек, использующий в качестве критерия оценки степени чистоты коэффициент трения скольжения;
5. Определен режим контроля чистоты поверхности, при котором для технологически чистой поверхности обеспечивается выполнение равенства $\mu = \mu_{тр.н}$, позволяющее осуществлять калибровку прибора, используя справочные значения $\mu_{тр.н}$ в качестве критерия соответствия поверхности – эталонной.

Практическая значимость результатов диссертационной работы подтверждается их внедрением в производство:

1. ОАО “Олимп”, г. Светловодск, Кировоградская область, Украина при изготовлении гибридных интегральных микросхем, используемых в производстве цифровых станций тропосферной связи.
2. ФГУП НИИ “Экран”, г. Самара при изготовлении пленочных элементов гибридных интегральных микросхем, используемых в производстве спецаппаратуры.

Модифицированный высоковольтный газоразрядный прибор, метод очистки поверхности диэлектрических подложек и трибометрический прибор экспресс-контроля их чистоты внедрены в учебный процесс специальности 210201 “Проектирование и технология радиоэлектронных средств” Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королева.

Основные положения диссертации, выносимые на защиту:

1. Метод оценки поверхностной концентрации органических загрязнений, удаляемых ПВГР.
2. Экспериментально установленные зависимости остаточной концентрации органических загрязнений на поверхности диоксида кремния от физических параметров процесса очистки: ускоряющего напряжения $0,3 \leq U \leq 5$ кВ, тока разряда $0,2 \leq I \leq 3$ mA, длительности процесса очистки $0 < t \leq 180$ с.
3. Метод очистки поверхности диоксида кремния в плазме высоковольтного газового разряда.
4. Модифицированный прибор, формирующий высоковольтный газовый разряд и обеспечивающий стабильность параметров плазмы в процессе очистки поверхности диоксида кремния.

5. Трибометрический метод неразрушающего экспресс-контроля чистоты поверхности подложек на основе связи коэффициентов трения скольжения и покоя для технологически чистой поверхности.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях, семинарах и симпозиумах: “Триболог-9М” с международным участием “Направления развития методологии и средств испытания и диагностики трибообъектов”, Москва-Рыбинск-Ростов, 1992 г.; II-ой Международной научно-технической конференции “Актуальные проблемы фундаментальных наук”, г. Москва, 1994 г.; Международной научно-технической конференции “Перспективные технологии в средствах передачи информации”, г. Владимир, 1995 г.; Научной конференции “Актуальные проблемы анализа и обеспечения надежности и качества приборов, устройств и систем”, Пенза, 1997 г.; II-м Международном симпозиуме “Аэрокосмические приборные технологии”, Санкт-Петербург, 2002 г.; International conference “Micro- and nanoelectronics-2005”, Moscow (Zvenigorod), 2005 г.; Всероссийской научно-технической конференции “Актуальные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций”, Самара 2006 г., 2007 г.; Всероссийской научно-технической конференции “Методы создания, исследования материалов, приборов и экономические аспекты микроэлектроники”, Пенза, 2006 г.; VII, VIII международной научно-технической конференции “ABIA”, Киев, 2006 г., 2007 г. Результаты работы докладывались на научных семинарах Института систем обработки изображений РАН, кафедр технической кибернетики и электронных систем и устройств СГАУ.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 17 работ, в том числе 8 статей, из них 8 - в рецензируемых научных журналах и изданиях, определенных Высшей аттестационной комиссией, 7 тезисов докладов на научно-технических Международных и Всероссийских конференциях, симпозиумах и семинарах, 2 патента на изобретения.

Объем и структура диссертации.

Диссертация состоит из введения, трех глав с краткими выводами, заключения, списка цитируемой литературы и приложения. Она изложена на 142 страницах машинописного текста и содержит 51 рисунок, 14 таблиц. В списке цитируемой литературы 151 наименование.

Содержание работы

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и основные задачи диссертации, дан обзор научных работ по рассматриваемой тематике, приведены основные положения, представляющие научную новизну и практическую ценность работы,

сформулированы основные положения, выносимые на защиту, описана структура диссертации.

В первой главе представлены результаты модификации высоковольтного газоразрядного прибора при практическом использовании которого были обнаружены микропробой в системе анод-катод и паразитные газовые разряды в системах поверхностей высоковольтных кабеля, ввода электропитания, технологической оснастки и стенки рабочей камеры (рис. 1а,б,в). Для их устранения проведена модификация прибора: в конструкцию изоляции катода введена фторопластовая прокладка (см. рис. 1а, (поз.5), г), выполнена проточка по торцу ее внутреннего диаметра, образующая зазор d , увеличивающий электросопротивление в системе анод-

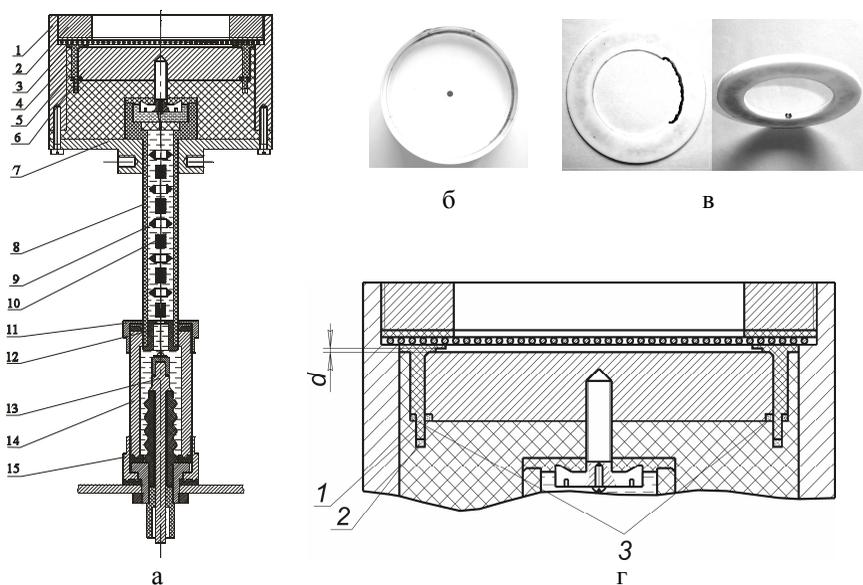


Рисунок 1 - Схема конструкции: а - газоразрядного прибора (1 - корпус; 2 - анодное кольцо; 3 - анод-сетка с медным кольцом; 4 - изолятор катода; 5 - фторопластовая прокладка; 6 - катод; 7 - крышка корпуса; 8 - фторопластовая оболочка; 9 - стабилизирующие диски; 10 - трубочки; 11 – верхняя крышка высоковольтного ввода; 12 – фторопластовый стакан; 13 - керамический ввод; 14 – корпус высоковольтного ввода; 15 – нижняя крышка высоковольтного ввода); б, в - фотографии следов электропробоя на элементах катодного узла ВГП; г – схема катодного узла (1 - п-образная проточка; 2 - вакуумное масло; 3 - вакуумная резина)

катод, в изоляторе катода выполнена проточка в виде п-образной канавки (рис.1г, поз.1), заполненная вакуумным маслом (см. рис. 1г, поз.2), разработана оригинальная конструкция высоковольтного кабеля (рис.1 а, поз. 8,9,10) и ввода электропитания прибора (рис. 1а, поз. 11,12,13,14,15). Внутренние полости изолирующих элементов залиты вакуумным маслом.

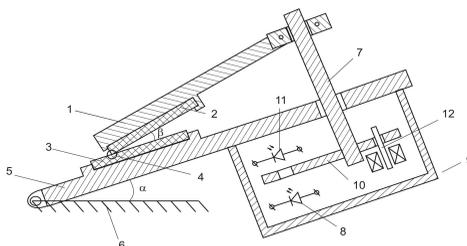
Конструкция кабеля позволяет осуществить жесткую фиксацию положения токопровода по центру внутренней полости оболочки, делая равномерным распределение электрического поля по всей длине кабеля.

Модификация позволила устранить возможность возникновения электропробоя элементов конструкции ВГП и снизить колебания тока газового разряда до 1,5...2%, что обеспечило стабильность параметров процесса очистки поверхности диоксида кремния при длительной работе прибора.

Вторая глава посвящена разработке метода и прибора неразрушающего экспресс-контроля чистоты поверхности (ПЭКЧП) подложек, используемых в качестве критерия ее оценки коэффициент трения скольжения. Внешний вид прибора и схема конструкции его подложкодержателей представлены на рис. 2 а,б.



а



б

Рисунок 2 – Внешний вид (а) и схема конструкции подложкодержателей ПЭКЧП (б): 1 - подложкодержатель подложки-зонда; 2 - подложка-зонд; 3 - исследуемая подложка; 4 – точка трибометрического взаимодействия двух подложек; 5 - подложкодержатель исследуемой подложки; 6 - корпус трибометрического прибора; 7 - штанга крепления подложкодержателя подложки-зонда; 8 - светодиод; 9 - светонепроницаемая крышка; 10 - металлический диск; 11- фотодиод; 12 - фиксатор штанги

Достоинством предлагаемого метода является использование в качестве зонда подложки, прошедшей идентичную с контролируемой поверхностью операцию очистки. Это устраняет необходимость применения в процессе контроля специальных технологий очистки поверхности зонда.

Подложки располагаются под углом друг к другу, образуя точечный контакт. При достижении технологической чистоты подложка-зонд перестает скользить по исследуемой поверхности, т.к. выполняется равенство $\mu = \mu_{mp.n}$, где μ и $\mu_{mp.n}$ – коэффициенты трения скольжения и покоя, соответственно. Таким образом, чистота исследуемой поверхности соответствует чистоте, при которой измеряется численное значение $\mu_{mp.n}$, что дает право использовать его в качестве критерия эталонного значения чистоты поверхности подложек.

Определены рабочие диапазоны параметров ПЭКЧП $30^0 \leq \alpha \leq 60^0$, $4^0 \leq \beta \leq 6^0$ и $N < 0,3$ кг (где N – нагрузка подложки-зонда на исследуемую поверхность) в области которых отсутствуют механические повреждения поверхности при трибометрическом взаимодействии подложек (рис. 3 а,б,в,г,д).

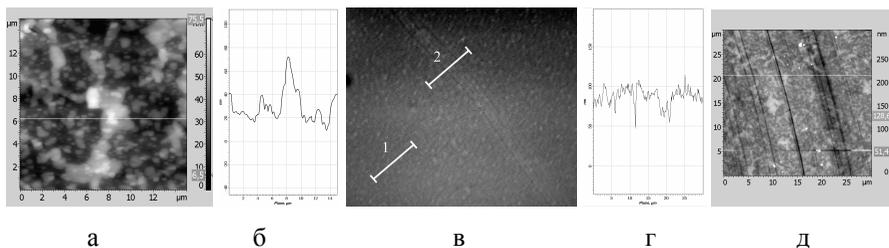


Рисунок 3 - Вид поверхности исследуемых подложек, полученный на сканирующем зондовом микроскопе (СЗМ) Solver PRO-M фирмы "НТ-МДТ"
 а,б - изображение и профилограмма исходной поверхности, соответственно; в - микрофотография исследуемой поверхности (1 – при нагрузке подложки-зонда на исследуемую поверхность 0,2кг; 2 – 0,3 кг); г- профилограмма в области участка 2; д – АСМ изображение исследуемой поверхности при $\beta > 6^0$

Для увеличения разрешающей способности прибора в 16 раз в окна металлического диска (см. рис. 2б) помещена микронониусная решетка с периодом $T = 63$ мкм и шириной щели $b = 20$ мкм, разбивающая световой поток на световые импульсы.

Предложено выражение, обеспечивающее перевод показаний трибометра в значения концентрации загрязнений на поверхности подложки:

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

где τ , τ_0 - значения длительности измеряемого импульса на контролируемой подложке и длительности импульса для подложки с поверхностью, покрытой мономолекулярной пленкой загрязнений, соответственно.

Таким образом, полученные в диссертационной работе результаты позволяют увеличить точность измерения, разрешающую способность прибора и упростить его калибровку, устранив необходимость использования эталонных поверхностей.

Третья глава посвящена разработке методов формирования технологически чистой поверхности диоксида кремния в ПВГР в среде воздуха. Проведен анализ методов удаления органических загрязнений с поверхности подложки, выявивший их недостатки: необходимость использования особо чистых реактивов и газов, неравномерность очистки, эффект загрузки, неустойчивость резонансной частоты в ВЧ, СВЧ генераторах, значительное энергопотребление и сложность их конструкции при формировании широкоапертурных потоков плазмы.

Разработана методика контролируемого загрязнения поверхности подложек слоями вакуумного масла, позволяющая обеспечить воспроизводимость свойств исходной поверхности при загрязнении в вакуумной камере в течение $t = 60$ мин и при давлении 1,33 Па.

Показано, что основными процессами взаимодействия частиц плазмы с органическими загрязнениями на поверхности являются:

- 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 электронным ударом.

На основе данных механизмов предложен метод оценки остаточной концентрации органических загрязнений поверхности диоксида кремния, описываемый аналитической зависимостью:

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

где I – ток разряда; U – ускоряющее напряжение; t – длительность процесса очистки; h – толщина пленки загрязнений; ρ – плотность загрязнений; B – значение штрафной функции, полученной из натурального эксперимента, являющийся константой; M – молярная масса органических загрязнений; U_{gr} –

напряжение на электродах газоразрядного прибора, при котором энергия иона в момент подлета его к поверхности обработки находится на границе энергий плазмохимического и ионно-химического травления; k_1 – коэффициент плазмохимического травления; $k_3^C, k_3^H, *$ – коэффициенты физического распыления атомов углерода и водорода; k_e^* – безразмерный коэффициент электронно – стимулированного травления; k_i^* – безразмерный коэффициент ионно – стимулированного травления; $Y = \frac{\gamma_e \eta}{(1 + \gamma_e)} \exp[(\alpha - \alpha_n) d_{\max}]$; $Z = \left(1 - \frac{d}{d_{\max}}\right) \frac{1}{q e S_K}$;

$$\theta = \frac{1}{1 + \frac{(k_1 + k_2^{NO}) J_i^-}{S_a J_n^{NO}}} + \frac{1}{1 + \frac{(k_1 + k_2^{NO_2}) J_i^-}{S_a J_n^{NO_2}}} + \frac{1}{1 + \frac{(k_1 + k_2^{N_2O}) J_i^-}{S_a J_n^{N_2O}}} + \frac{1}{1 + \frac{(k_1 + k_2^{O_2}) J_i^-}{S_a J_n^{O_2}}}$$

; d_{\max} – максимальное расстояние до подложки; S_K – площадь катода; q – геометрическая прозрачность сетчатого анода; $\gamma_e, \eta, \alpha, \alpha_n$ – коэффициенты вторичной эмиссии, фокусировки электронного потока, ионизации и прилипания, соответственно; $k_2^{N_2O}, k_2^{O_2}$ – коэффициенты десорбции молекул NO, N₂O, NO₂, O₂; $J_n^{N_2O}, J_n^{O_2}$ – потоки нейтральных молекул на поверхность подложки; J_i^- – поток отрицательных ионов на подложку; S_a – коэффициент прилипания химически активных частиц к поверхности.

Получены экспериментальные зависимости остаточной концентрации органических загрязнений на поверхности диоксида кремния от физических параметров: ускоряющего напряжения, тока разряда, длительности процесса очистки (рис.4 а,б,в). Анализ данных зависимостей показывает наличие характерных участков:

1. $U > 2$ кВ (кривые 1,2, рис. 4а), $U > 2,5$ кВ (кривая 3, рис. 4а), $U > 3$ кВ (кривая 4, рис 4а); $I \leq 1,4$ мА (кривые 1,2,3, рис. 4б); $t > 65$ с (кривая 1, рис. 4в), $t > 60$ с (кривая 2, рис. 4в), $t > 50$ с (кривая 3, рис. 4в); $t > 30$ с (кривая 4, рис. 4в) – неэффективной очистки из-за преобладания процесса физического распыления органических загрязнений.

2. $U \leq 1,7$ кВ (кривая 3, рис. 4а), $U \leq 2,5$ кВ (кривая 4, рис. 4а); $I > 1,5$ мА (кривые 1,2,3, рис. 4б); $t \leq 20$ с (кривая 6, рис. 4в) – эффективной очистки, т.к. преобладают процессы ионно-химического (ИХТ), ионно-стимулированного (ИСТ), и электронно-стимулированного травлений (ЭСТ) органических загрязнений.

3. $U \leq 2$ кВ (кривые 1,2, рис. 4а), $1,5 < U < 2,5$ кВ (кривая 3, рис. 4а), $2,5 < U < 3$ кВ (кривая 4, рис. 4а); $1,4 < I \leq 1,5$ мА (кривые 1,2,3, рис. 4б); $t \leq 65$ с (кривая 1, рис. 4в), $t \leq 60$ с (кривая 2, рис. 4в), $t \leq 50$ с (кривая 3, рис. 4в), $t \leq 30$ с (кривая 4, рис. 4в), $t \leq 20$ с (кривая 5, рис. 4в) – соизмеримости скоростей протекания процессов физического распыления, ИХТ, ИСТ и ЭСТ.

Анализ теоретических и экспериментальных кривых, представленных на рис. 4в, показывает, что расхождение между ними не превышает 10%,

следовательно, предлагаемый метод оценки остаточных загрязнений на поверхности подложек является достоверным.

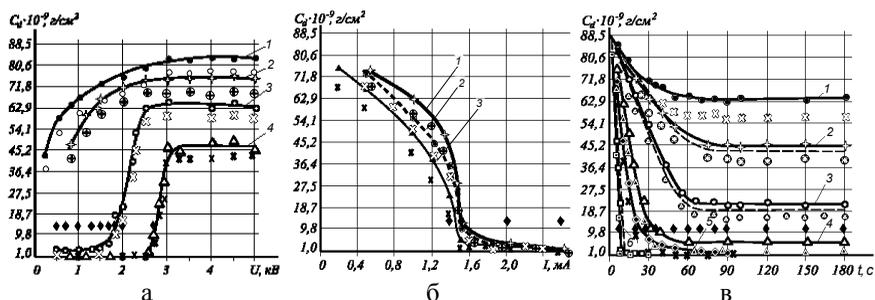
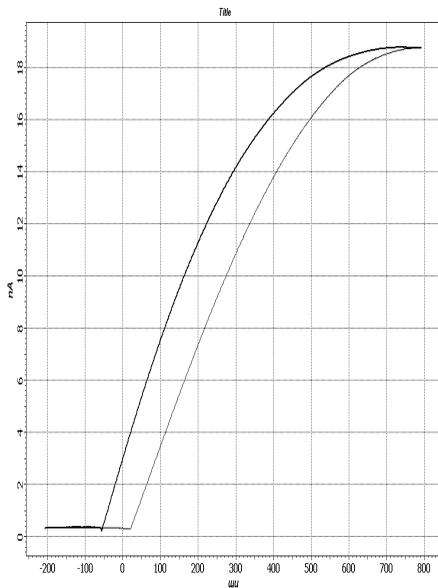


Рисунок 4 - Зависимость остаточной концентрации органических загрязнений на поверхности подложки от физических факторов процесса очистки:
 а- ускоряющего напряжения (1 - 0,5мА; 2 - 1 мА; 3 - 2 мА; 4 - 3мА; t = 10с);
 б - тока разряда (U = 3 кВ: 1 - t = 50 с; 2 - t = 60 с; 3 - t = 120 с);
 в - длительности очистки: (1 – 0,5 мА; 2 – 1мА; 3 – 1,4 мА; 4 – 1,5 мА;
 5 – 2,6 мА; 6– 3 мА; U = 3кВ). Штриховыми линиями показана расчетная зависимость (2). ♦ - точки, полученные методом конденсации;
 ○, ×, ⊙, ⊚, ⊕, △, ⊛, ⊞, □ - прибором ИЧ-2

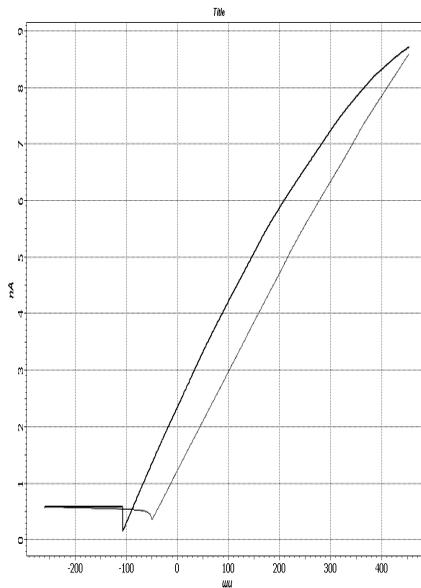
На основании экспериментальных зависимостей определен режим очистки поверхности подложек диоксида кремния в ПВГР до уровня технологической чистоты (10^{-9} г/см²): $U = 1,2$ кВ, $I = 3$ мА, $t = 10$ с и разработана методика их финишной очистки.

Эффективность разработанной методики подтверждается результатами исследования поверхности на СЗМ Solver PRO-M до, и после очистки в ПВГР. Обнаружено, что на поверхности исходных подложек присутствует мономолекулярный слой вакуумного масла (см. рис. 5 а), а на очищенной – адсорбированный слой молекул воды (см. рис. 5 б). Изменение свойств поверхности с гидрофобных на гидрофильные подтверждает удаление пленки вакуумного масла и позволяет считать поверхность после проведения финишной очистки технологически чистой.

Качество финишной очистки поверхности по разработанной методике подтверждается и результатами исследований зависимости адгезии маскирующих слоев хрома (Cr) от времени загрязнения поверхности исходных подложек (рис. 6). Согласно полученным результатам адгезия пленок Cr после финишной очистки имеет значение $18,3$ Н/мм² (кривая 3, рис. 6), в то время как для подложек, не подвергшихся финишной очистке, значения адгезионной прочности изменяются в диапазоне от 4 до $16,5$ Н/мм²



а



б

Рисунок 5 – Силовые кривые исследуемой поверхности подложек, полученные на СЗМ Solver PRO-M: а - до финишной очистки (измеренное значение толщины пленки загрязнений 3 нм, соответствует расчетной длине молекулы вакуумного масла); б - после финишной очистки (измеренное значение толщины пленки воды 20 нм)

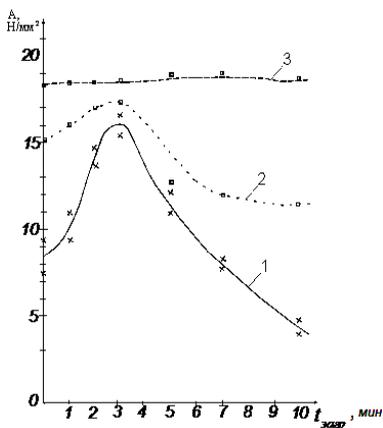


Рисунок 6 - Зависимость адгезии пленки Cr от времени загрязнения поверхности подложки: 1 - до облучения подложки; 2 – после облучения в режиме $I=100$ мА; $U=2$ кВ; $t=5$ мин; 3- адгезия пленок Cr на подложках, прошедших финишную очистку в режиме $I=3$ мА; $U=1,2$ кВ; $t=10$ сек

(кривые 1,2, рис. 6). Характер изменения кривой 3 (рис. 6) свидетельствует о формировании технологически чистой поверхности.

Таким образом, результаты проведенных исследований теоретически и экспериментально подтверждают эффективность методов формирования технологически чистой поверхности диоксида кремния в плазме высоковольтного газового разряда, предложенных в диссертационной работе.

Заключение

В диссертации разработаны и исследованы методы и приборы, предназначенные для создания технологически чистой поверхности диоксида кремния на широкоформатных подложках.

Основными результатами работы являются:

1. Предложен новый модифицированный прибор, формирующий направленный поток отрицательно заряженных частиц низкотемпературной плазмы высоковольтного газового разряда диаметром не менее 78 мм, обеспечивающий за счет введения новых конструктивных элементов отсутствие паразитных микрозарядов и стабильность параметров плазменного потока в процессе очистки поверхности подложек в диапазоне токов 0-140 мА, ускоряющих напряжений 0-5 кВ, с высокой степенью равномерности распределения заряженных частиц по сечению потока (98%).

2. Созданы новый метод и прибор трибометрического неразрушающего экспресс-контроля чистоты поверхности подложек на основе связи коэффициентов трения скольжения μ и покоя $\mu_{mp.n}$, которая позволяет осуществлять калибровку прибора, используя справочные значения $\mu_{mp.n}$ в качестве критерия соответствия поверхности - эталонной; применение в качестве зонда подложки, подобной исследуемой, устранило необходимость использования специальной технологии для очистки ее поверхности.

3. Экспериментально исследованы режимы работы трибометрического прибора и определены оптимальные диапазоны изменения угла наклона подложки-зонда к исследуемой поверхности $4^0 \leq \beta \leq 6^0$ и угла наклона плоскости подложкодержателя исследуемой подложки к оси горизонтали $30^0 \leq \alpha \leq 60^0$.

4. Разработан метод оценки остаточной концентрации органических загрязнений, достоверно описывающий связь величины концентрации загрязнений на поверхности подложки с физическими параметрами газоразрядного прибора (напряжение на электродах 0,3-5 кВ, ток разряда 0,2-3 мА, время очистки 0-3 минуты) и процесса травления органических загрязнений на поверхности диоксида кремния в ПВГР (отношение потоков нейтральных и заряженных частиц, степень заполнения поверхности

активными частицами, коэффициенты десорбции, прилипания и распыления).

5. Экспериментально установлены значения параметров физического процесса (ток разряда - 3 мА, напряжение – 1,2 кВ, температура подложки – 300К, время очистки 10 сек), при которых достигается уровень технологически чистой поверхности, равный 10^{-9} г/см².

6. Разработан и экспериментально исследован метод финишной очистки поверхности диоксида кремния в плазме высоковольтного газового разряда.

Основное содержание диссертации опубликовано

в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях, определенных Высшей аттестационной комиссией:

1. Колпаков, В.А. Устройство экспресс-контроля чистоты поверхности диэлектрических подложек [Текст] / В.А. Колпаков, А.И. Колпаков, С.В. Кричевский // Приборы и техника эксперимента. - 1995. - №5. - С.199-200.
2. Колпаков, В.А. Ионно-плазменная очистка поверхности контактов реле малой мощности [Текст] / В.А. Колпаков, А.И. Колпаков, С.В. Кричевский // Электронная промышленность. - 1996. - №2. - С. 41-44.
3. Казанский, Н.Л. Моделирование процесса очистки поверхности диэлектрических подложек в плазме газового разряда высоковольтного типа [Текст] / Н.Л. Казанский, В.А. Колпаков, С.В. Кричевский // Компьютерная оптика. – 2005. - № 28. - С. 80-86.
4. Казанский, Н.Л. Оптимизация параметров устройства трибометрического измерения чистоты поверхности подложек [Текст] / Н.Л. Казанский, В.А. Колпаков, А.И. Колпаков, С.В. Кричевский, Н.А. Ивлиев // Компьютерная оптика. – 2005. - № 28. - С. 76-79.
5. Kazanskiy, N.L. Simulating the process of dielectric substrate surface cleaning in high-voltage gas discharge plasma [Текст] / N.L. Kazanskiy, V.A. Kolpakov, S.V. Kritchevskiy // Proceedings of SPIE. – 2006. -Vol.6260. – P. 62601V-1 - 62601V-8.
6. Казанский, Н.Л. Исследование особенностей трибометрического взаимодействия диэлектрических подложек при экспресс-контроле степени чистоты их поверхности [Текст] / Н.Л. Казанский, В.А. Колпаков, А.И. Колпаков, С.В. Кричевский, Н.А. Ивлиев // Компьютерная оптика. -№ 31.- 2007. С. 42-46.
7. Kazanskiy, N.L. Interaction of Dielectric Substrates in the Course of Tribometric Assessment of the Surface Cleanliness [Текст] / N.L. Kazanskiy, V.A. Kolpakov, S.V. Karpeev, S.V. Kritchevskiy, Ivliev N.A. // Optical Memory and Neural Networks (Information Optics). – 2008. -Vol.17. –No.1 – P. 37-42.

8. Kazanskiy, N.L. Parameter Optimization of a Tribometric Device For Rapid Assessment of Substrate Surface Cleanliness [Текст] / N.L. Kazanskiy, V.A. Kolpakov, A.I. Kolpakov, S.V. Kritchevskiy, M.V. Desjatov // Optical Memory and Neural Networks (Information Optics). – 2008. -Vol.17. –No.2 – P. 167-172.

в других изданиях:

9. Пат. 2295791 Российская Федерация, МПК⁷ Н 01 В 7/18. Кабель для электропитания генераторов низкотемпературной плазмы. [Текст] / Казанский Н.Л., Колпаков В.А., Колпаков А.И., Кричевский С.В.; заявитель и патентообладатель ИСОИ РАН. - № 2005118364; заявл. 14.06.05; опубл. 20.03.07, Бюл. № 8. – 5 с.
10. Пат. 2307339 Российская Федерация, МПК⁷ G 01 N 19/08. Способ измерения чистоты поверхности подложек/ [Текст] / Казанский Н.Л., Колпаков А. И., Колпаков В.А., Кричевский С.В., Ивлиев Н.А.; заявитель и патентообладатель ИСОИ РАН. - № 2005118279; заявл. 14.06.05; опубл. 27.09.07, Бюл. № 27. – 5 с.
11. Казанский, Н.Л. Моделирование механизма ионно-плазменной очистки поверхности диэлектрических подложек [Текст] / Н.Л. Казанский, А.И. Колпаков, В.А. Колпаков, С.В. Кричевский // Сборник материалов II-го Международного симпозиума «Аэрокосмические приборные технологии». - Санкт-Петербург, 2002. - С.89-90.
12. Kazanskiy, N.L. Simulating the process of dielectric substrate surface cleaning in high-voltage gas discharge plasma [Текст] / N.L. Kazanskiy, V.A. Kolpakov, S.V. Kritchevskiy // Abstracts of international conference “Micro- and nanoelectronics-2005”. - Moscow (Zvenigorod), 2005, - P 1-43.
13. Казанский, Н.Л. Неразрушающая диагностика чистоты поверхности диэлектрических подложек [Текст] / Н.Л. Казанский, А.И. Колпаков, В.А. Колпаков, С.В. Кричевский // Матеріали VII міжнародної науково-технічної конференції “АВІА-2006”. - Київ: НАУ, 2006. - Т.1.- С. 11.65-11.68.
14. Казанский, Н.Л. Исследование механизмов очистки поверхности подложек потоком газоразрядной плазмы высоковольтного типа [Текст] / Н.Л. Казанский, В.А. Колпаков, С.В. Кричевский // Сб. ст. Всероссийской научно-технической конференции “Методы создания, исследования материалов, приборов и экономические аспекты микроэлектроники”. Пенза, 2006. – С. 19-22.
15. Казанский, Н.Л. Метод оценки остаточной концентрации органических загрязнений на поверхности диоксида кремния [Текст] / Н.Л. Казанский, А.И. Колпаков, В.А. Колпаков, С.В. Кричевский // Матеріали VIII

міжнародної науково-технічної конференції “АВІА-2007”. Київ: НАУ, - 2007. -Т.1. - С. 14.5-14.8.

16. Казанский, Н.Л. Исследование механизмов формирования технологически чистой поверхности. [Текст] / Н.Л. Казанский, А.И. Колпаков, В.А. Колпаков, С.В. Кричевский // Материалы докладов Всероссийской научно-технической конференции “Актуальные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций”. - Самара, 2007г. - С. 46-47.
17. Казанский, Н.Л. Исследование особенностей механизма трибометрического взаимодействия диэлектрических подложек при проведении процесса измерения чистоты поверхности. [Текст] / Н.Л. Казанский, А.И. Колпаков, В.А. Колпаков, С.В. Кричевский, Ивлиев Н.А. //Материалы докладов Всероссийской научно-технической конференции “Актуальные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций”. – Самара, 2007г. - С. 34-35.

Подписано в печать – 12.11.2008г. Формат – 60х84 1/16.
Усл. печ. л. 1,1. Тираж 100 экз.

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