

знания таких закономерностей не позволяет обеспечить стабильную работу РЭА при различных условиях ее эксплуатации. Современные методы диагностирования полупроводниковых приборов базируются на анализе явлений на макроуровне и калибровке их по эталонным образцам.

Очевидно, что такой подход не позволяет не только достоверно прогнозировать параметрическую надежность диагностируемых приборов, но даже верно определить диапазон применимости этого явления для диагностирования и делает невозможным решение задачи повышения эффективности. Решением этих задач является изучение используемых электрофизических эффектов на микроскопическом уровне, определяющем всё многообразие форм существования этого эффекта, одну из разновидностей которого предлагается использовать для электрофизического диагностирования приборов.

Обнаружена корреляция параметров динамической электромагнитной неустойчивости в биполярном транзисторе при питании переменным током с параметрами микроструктур, сформированными на его поверхности. Предложена физико-математическая модель явления динамической электромагнитной неустойчивости в биполярной структуре, описывающая на микроуровне эффект формирования отрицательного дифференциального сопротивления в результате поверхностного пробоя в области база-коллектор при питании переменным током. Определены и обоснованы критерии оценки качества транзисторов по вольтамперной характеристике в динамическом режиме их питания.

## **АНАЛИЗ ДОСТОВЕРНОСТИ МЕТОДА ОЦЕНКИ ЧИСТОТЫ ПОВЕРХНОСТИ ТВЕРДЫХ ТЕЛ БОМБАРДИРУЕМОЙ ОТРИЦАТЕЛЬНЫМИ ЧАСТИЦАМИ ВНЕЭЛЕКТРОДНОГО ГАЗОВОГО РАЗРЯДА**

**В.А. Колпаков, А.И. Колпаков, С.В. Кричевский**

Самарский государственный аэрокосмический университет,

г. Самара

Развитие микро- и нанoeлектроники потребовало перехода к широкоформатным подложкам при осуществлении технологических операций изготовления пленочных микроструктур для микросхем и элементов дифракционной оптики. Это повышает требования к проведению процесса финишной очистки подложек, т.к. размеры элементов интегральных микросхем становятся соизмеримыми с локальными загрязнениями [1], для устранения которых используют методы очистки в потоках низкотемпературной плазмы. В работах [2,3] рассмотрены основные

процессы взаимодействия частиц плазмы внеэлектродного газового разряда (ПВГР) с органическими загрязнениями на поверхности подложек диоксида кремния и приведен метод оценки остаточной концентрации органических загрязнений:

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

$$\text{где } Z = \left(1 - \frac{d}{d_{max}}\right) \frac{1}{qeS_K} ; Y = \frac{\gamma_1 \eta}{(1 + \gamma_1)} \exp[(\alpha - \alpha_n) d_{max}].$$

Достоверность расчетных значений подтверждалась экспериментально измерением чистоты поверхности подложек трибометрическими методами, используя методику определения числовых значений коэффициента трения скольжения калиброванным прибором ИЧ-2 и методом конденсации (см. рис. 1, а, б, в) [4,5].

Обнаружено, что разброс показаний, полученных разными методами для одних и тех же режимов, не превышает 10%. Завышенные значения концентрации загрязнений, измеренные методом конденсации, обусловлены предельной его чувствительностью, равной  $10^{-8}$  г/см<sup>2</sup> [5].

С другой стороны, заниженные значения величины  $C_d$ , измеренные прибором ИЧ-2, обусловлены его погрешностью, вызванной явлением срыва зонда, плохой воспроизводимостью сопротивления сигнальных контактов, трением движущихся узлов прибора. Для сравнения на рис. 1, в приведены также расчетные зависимости, полученные с помощью выражения (1). Наблюдается хорошее соответствие расчетных кривых экспериментальным данным, что говорит о достоверности механизмов взаимодействия заряженных частиц ПВГР с органикой, заложенных в разработанную модель физического процесса очистки поверхности подложек.

Авторами работ [1,6] установлено, что получение воспроизводимых результатов при плазмохимическом травлении микроэлектронных структур без геометрических искажений микропрофиля возможно только при количестве загрязнений на поверхности порядка  $10^{12}$  см<sup>-1</sup> ( $10^{-9}$  г/см<sup>2</sup>) и менее. Применение финишной очистки поверхности подложек в ПВГР [2,3] показало, что параметры поверхности микрорельефа (рис. 2, а) значительно превосходят аналогичные параметры микрорельефа, полученного с применением химической очистки [2,3] поверхности подложки (рис. 2, б).

Хорошая равномерность и однородность по всей площади поверхности подложки без какого-либо проявления эффекта подтравливания

с практически вертикальным профилем стенок характерна только для подложек, прошедших финишную очистку в плазме ПВГР.

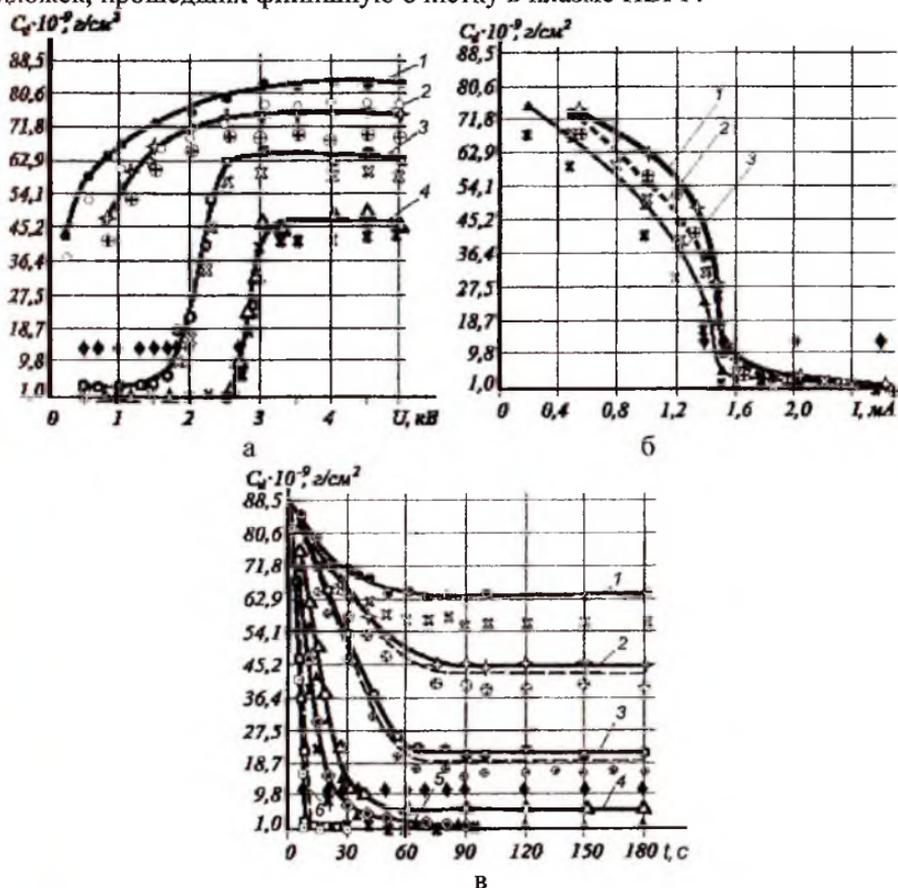


Рис. 1. Зависимость остаточной концентрации органических загрязнений на поверхности подложки от физических факторов процесса очистки:

а - ускоряющего напряжения (1 - 0,5 мА; 2 - 1 мА; 3 - 2 мА; 4 - 3 мА;  $t = 10$  с);

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 - 1 мА; 3 - 1,4 мА; 4 - 1,5 мА;

5 - 2,6 мА; 6 - 3 мА;  $U = 3$  кВ). Штриховыми линиями показана расчетная зависимость

(2). ♦ - точки, полученные методом конденсации;

○, ✕, ⊗, ⊕, ⊙, △, ☆, □ - прибором ИЧ-2

Эффективность разработанной методики подтверждается также 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. 3, а), а на очищенной – адсорбированный слой молекул воды (см. рис. 3, б). Изменение свойств поверхности с гидрофобных на гидрофильные подтверждает

удаление пленки вакуумного масла и позволяет считать поверхность после проведения финишной очистки технологически чистой.

Если на исходной поверхности присутствует пленка масла и она обладает гидрофобными свойствами (показания СЗМ 3 нм), то после финишной очистки поверхность обладает гидрофильными свойствами, поэтому она активно адсорбирует воду, и толщина слоя при этом, с учетом капиллярного эффекта [7], соответствует показаниям СЗМ Solver PRO-M, равным 20 нм. Данные показания получены с помощью пакетов прикладных программ, используемых в комплекте с прибором. Следовательно, можно сделать вывод, что кривая, полученная методом контактной атомно-силовой микроскопии, представленная на рис. 3, описывает технологически чистую поверхность, т.к. на ней отсутствуют молекулы вакуумного масла.

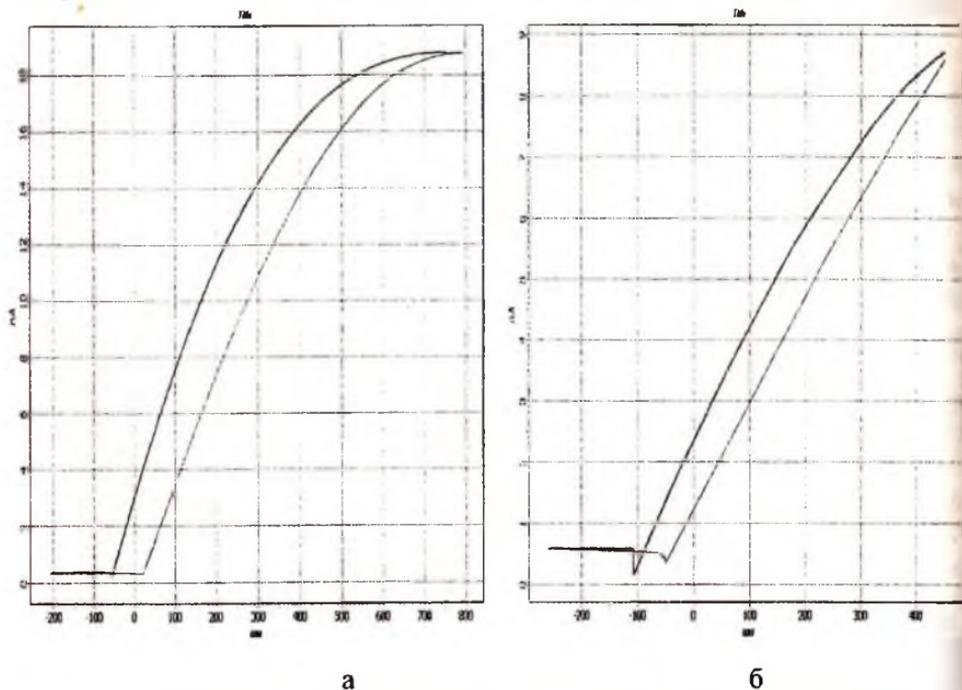


Рис. 3. Силовые кривые исследуемой поверхности подложек, полученные на СЗМ Solver PRO-M: а - до финишной очистки (измеренное значение толщины пленки загрязнений 3 нм соответствует расчетной длине молекулы вакуумного масла); б - после финишной очистки (измеренное значение толщины пленки воды 20 нм)

Качество финишной очистки поверхности по разработанной методике подтверждается и результатами исследований зависимости адгезии маскирующих слоев хрома (Cr) от времени загрязнения поверхности исходных подложек (рис. 4). Согласно полученным результатам адгезия пленок Cr после финишной очистки имеет значение  $18,3 \text{ Н/мм}^2$  (кривая 3, рис. 4), в то

время как для подложек, не подвергшихся финишной очистке, значения адгезионной прочности изменяются в диапазоне от 4 до 16,5 Н/мм<sup>2</sup>.

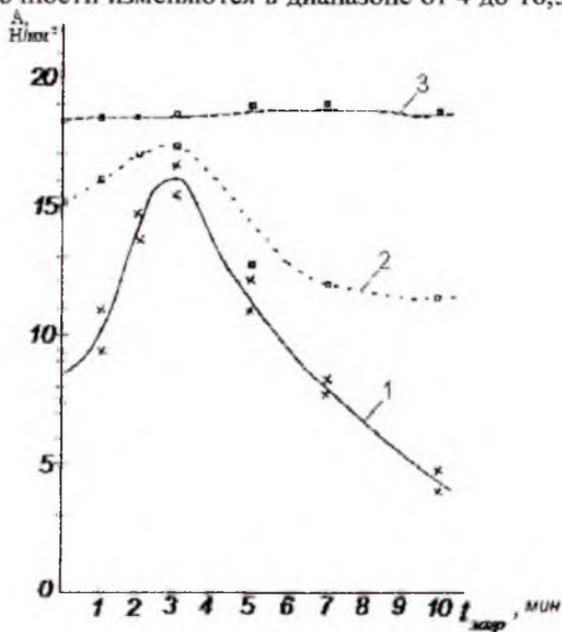


Рис. 4. Зависимость адгезии пленки Cr от времени загрязнения поверхности подложки: 1- до облучения подложки; 2- после облучения в режиме  $I=100$  мА,  $U=2$  кВ;  $t=5$  мин; 3- адгезия подложек прошедших финишную очистку в режиме  $I=3$  мА;  $U=1,2$  кВ;  $t=10$  сек

Характер изменения кривых показывает, что как количество органических загрязнений, так и качественный состав их структуры оказывают существенное влияние на адгезионную прочность пленок. Экстремум на кривой 1 при времени загрязнения 3 мин объясняется тем, что за это время загрязнения на поверхности подложки образуется мономолекулярная пленка органических загрязнений, адгезия которых к поверхности максимальна [8]. Дальнейшее увеличение времени загрязнения приводит к уменьшению адгезии за счет формирования большего числа слоев. Отжиг структуры Cr-SiO<sub>2</sub> потоком низкотемпературной плазмы (кривая 2) увеличивает адгезию на подложках до уровня 17,3 Н/мм<sup>2</sup>, что объясняется установлением новых химических связей между разрушающимися молекулами вакуумного масла и поверхностями Cr и Si. Однако численные значения адгезии не достигают уровня технологически чистой поверхности (кривая 3), т.к. связи, возникающие непосредственно между пленкой Cr и поверхностью SiO<sub>2</sub>, формируются за счет возникновения окислов и силицидов, имеющих ковалентную связь [9] с энергией связи сотни килокалорий/моль. Это на порядок больше энергии молекулярных связей молекул типа C<sub>33</sub>H<sub>64</sub>. Другим отличием кривой 3 является ее

прямолинейность, располагающаяся параллельно оси  $t_{\text{загр}}$ , что говорит о том, что финишная очистка в ПВГР позволяет очищать даже многослойные пленки органических загрязнений и действительно формирует технологически чистую поверхность ( $10^{-9}$  г/см<sup>2</sup>).

Таким образом, в настоящей работе экспериментально доказаны достоверность метода оценки чистоты поверхности диоксида кремния, прошедшей финишную очистку в ПВГР, и достижение при этом технологической чистоты поверхности диоксида кремния не хуже  $10^{-9}$  г/см<sup>2</sup>.

#### Список использованных источников

1. Орликовский, А.А. Плазменные процессы в микро- и нанoeлектронике. Часть 1. Реактивное ионное травление [Текст] / А.А. Орликовский // Микроэлектроника. - 1999. - Т.28. - №5. - С. 344-362.

2. Казанский Н.Л., Колпаков А. И., Колпаков В.А., Кричевский С.В. Метод оценки остаточной концентрации органических загрязнений на поверхности диоксида кремния /Неразрушающая диагностика чистоты поверхности диэлектрических подложек // Матеріали VIII міжнародної науково-технічної конференції "АВІА-2007". Т.1.Київ: НАУ, -2007. -С. 14.5-14.8.

3. 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.

4. 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.

5. Вестфаль, О.Л. Методы и средства контроля чистоты и качества поверхности полупроводников [Текст] / О.Л. Вестфаль, А.Т. Мягков // Обзоры по электронной технике. Серия 6 "Материалы", выпуск 9(406). - М.: ЦИИ "Электроника", 1976. - 35 с.

6. Аверкин, С.Н. Некоторые применения микроволнового источника плотной плазмы в субмикронной технологии кремниевых интегральных схем [Текст] / С.Н. Аверкин, К.А. Валиев, В.А. Наумов, А.В. Калинин, Л.Д. Кривошипский, А.А. Орликовский, А.А. Рылов // Микроэлектроника. - 2001. - Т. 30. - № 3. - С. 243-246.

7. Булатов, А.Н. Исследование адсорбата воздуха на твердотельных подложках методами атомно-силовой микроскопии [Текст] / Булатов А.Н., Хартов С.В. // Известия высших учебных заведений. Электроника. - 2004. - № 4. - С. 9-17.

8. Колпаков, В.А. Механизм адгезии в структурах металл-диэлектрик после бомбардировки потоком заряженных частиц. I. Моделирование механизма увеличения адгезии [Текст] / В.А. Колпаков // Физика и химия обработки материалов. - 2006. - №5. - С. 41-48.

9. Черножуков, Н.И. Химия минеральных масел [Текст]/ Н.И. Черножуков - М.-Л.: Гостехиздат, 1955. - 322с.