

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОЧИСТКИ ПОВЕРХНОСТИ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОДЛОЖЕК В ПЛАЗМЕ ГАЗОВОГО РАЗРЯДА ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ТИПА

*Н.Л. Казанский, В.А. Колтаков, С.В. Кричевский*

*Институт систем обработки изображений РАН*

*Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева*

## **Аннотация**

Теоретически и экспериментально исследован механизм очистки поверхности диэлектрических подложек в низкотемпературной плазме газового разряда высоковольтного типа (ГРВТ). Показано, что основными факторами, влияющими на чистоту поверхности, являются время облучения, ток разряда, ускоряющее напряжение. Получена универсальная зависимость, связывающая величину изменения поверхностной концентрации загрязнений со скоростью удаления загрязнений и длительностью облучения. Показано хорошее соответствие экспериментальных данных с данной зависимостью. Установлено, что минимальные значения поверхностной концентрации загрязнений достигаются при времени облучения не менее 10 секунд, токе разряда не менее 10 мА, ускоряющем напряжении 2-3 кВ. На реальном примере травления канавок диоксида кремния в плазме ГРВТ в смеси хладона – 14 (CF<sub>4</sub>) и кислорода (O<sub>2</sub>) показано влияние чистоты поверхности подложки на геометрические параметры формируемого дифракционного микрорельефа. По результатам исследований разработана методика очистки поверхности диэлектрических подложек в плазме газового разряда высоковольтного типа, отличающиеся низкими себестоимостью и энергоемкостью, позволяющая производить очистку поверхности до уровня 10<sup>-9</sup> г/см<sup>2</sup>.

## **Введение**

Качество формируемого дифракционного микрорельефа определяется степенью чистоты поверхности подложек и её однородностью по всей площади пластины. Основным источником загрязнений пластины, прошедших химическую очистку и помещенных в рабочую камеру вакуумной установки, являются откачные средства, в процессе работы которых происходит выделение паров вакуумных масел и осаждение их на поверхности подложек [1]. Вследствие этого после каждого помещения подложки в рабочую камеру вакуумной установки, до операции травления необходимо проводить очистку их поверхности от органических загрязнений. В настоящее время широкое распространение получили плазменные технологии очистки поверхности, в которых для генерации однородной плазмы применяются высокочастотные и сверхвысокочастотные источники, отличающиеся конструктивной сложностью, высокой стоимостью и энергоемкостью. Тем не менее, в процессе обработки пластин в плазме, формируемой такими источниками, происходит загрязнение поверхности малоактивными или неактивными частицами, так как подложка находится между электродами газоразрядного устройства. Параметры плазмы в данном случае в значительной мере определяются свойствами обрабатываемой поверхности (loading effect). В работах [2-4] продемонстрированы достоинства плазмы газового разряда высоковольтного типа: формирование ионно-плазменного потока вне электродов газоразрядного устройства. В направлении поверхности в такой плазме осуществляют движение только отрицательно заряженные частицы (ионы, электроны), что ис-

ключает процесс её загрязнения частицами плазмы. В связи с этим задача теоретического и экспериментального исследования процесса очистки поверхности в плазме ГРВТ, с целью повышения качества изготавливаемого дифракционного микрорельефа, представляется актуальной.

## **Методика эксперимента**

Исследования проводились на ситалловых подложках и подложках диоксида кремния размером 30×20×1 мм<sup>3</sup>. Идентичность исходных свойств поверхности подложек обеспечивалась методикой контролируемого загрязнения [5]. Очистка поверхности подложек от органических загрязнений осуществлялась путем облучения исследуемых структур потоком плазмы, формируемого газоразрядным устройством высоковольтного типа [4]. Диапазоны изменений значений ускоряющего напряжения, тока разряда и длительности облучения составили 0-5 кВ, 0-3 мА, 5-180 секунд, соответственно. Диапазон изменения тока разряда выбирался из соображений обеспечения минимального нагрева подложки и исключения дефектообразования на ее поверхности. Рабочим газом служил воздух. Для обеспечения достоверности и воспроизводимости результатов эксперимента каждый режим повторялся на десяти одинаковых образцах. Разброс значений измеряемой концентрации загрязнений на поверхности составил не более 10%.

После облучения проводилось измерение степени чистоты поверхности подложек трибометрическим методом, основанным на зависимости скорости скольжения зонда по исследуемой поверхности от концентрации адсорбированных на ней органических загрязнений [6]. Скорость скольжения выража-

лась в относительных единицах – от нуля до единицы и являлась интегральной оценкой. При скорости скольжения  $V_{sl}=0$  концентрация загрязнений  $C_d$  принималась равной минимальной предельно обнаружимой концентрации, то есть  $C_d \leq C_{d \min}$ , а при  $V_{sl}=1 - C_d=C_{d \max}$ , где  $C_{d \max}=\rho h$  ( $\rho$  – плотность органических загрязнений,  $h$  – толщина слоя загрязнений) – концентрация примеси, соответствующая наличию на поверхности монослоя загрязнений. Для определения истинных значений величин  $C_{d \min}$ ,  $C_{d \max}$ , соответствующих предельным значениям  $V_{sl}=0$  и  $V_{sl}=1$ , проводились измерения эталонных подложек, одна из которых была загрязнена монослоем органических загрязнений (вакуумного масла), а другая максимально возможно очищена от них. Толщина мономолекулярного слоя загрязнений контролировалась на сканирующем зондовом микроскопе P4-SPM-MDT, а значение величины  $C_{d \min}$  принималось равным  $10^{-9}$  г/см<sup>2</sup> [6, 7]. Так как загрязнение поверхности носит равномерный характер, то скорость скольжения зонда пропорциональна концентрации загрязнений. С учетом сделанных утверждений перевод относительных значений скорости скольжения в значения поверхностной концентрации органических загрязнений, измеряемой в г/см<sup>2</sup>, осуществлялся по выражению:

$$C_d = (1 - V_{sl}) C_{d \min} + C_{d \max} V_{sl},$$

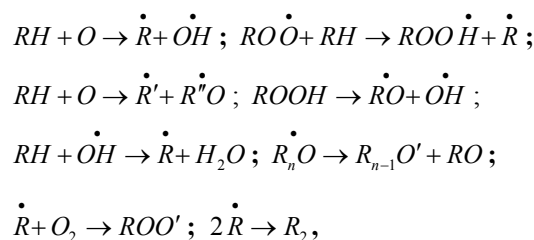
$$C_d = C_{d \min} + C_{d \max} V_{sl}, \quad (1)$$

где  $C_d$  – концентрация органического загрязнения, г/см<sup>2</sup>.

### Механизм очистки

Очистка поверхности диэлектрических подложек осуществлялась в плазме воздуха газового разряда высоковольтного типа. Согласно [3, 4] в такой плазме в направлении поверхности будут осуществлять движение отрицательно заряженные частицы. В случае, когда рабочим газом является воздух, состоящий из 78% азота и 21% кислорода, такими частицами будут отрицательные ионы кислорода и электроны. Положительные ионы азота и кислорода будут двигаться в направлении катода газоразрядного устройства. При высоких давлениях газа в рабочей камере, то есть при низких значениях ускоряющих напряжений  $0,5 \leq U \leq 1$  кВ, на поверхности подложки всегда присутствует слой адсорбированных на ней нейтральных молекул NO, N<sub>2</sub>O, NO<sub>2</sub>, образованных в результате рекомбинации ионов кислорода с ионами азота [2], и молекул N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>. Химические реакции данных соединений с молекулами органических загрязнений, представляющих собой углеводороды (-C<sub>x</sub>H<sub>y</sub>-C<sub>m</sub>H<sub>n</sub>-), без дополнительной их активации либо не протекают, либо протекают слабо. Процесс удаления загрязнений, при наличии ионной бомбардировки, осуществляется по механизму плазмохимического травления (ПХТ), подробно

описанного в работах [3, 4]. Под действием ионной бомбардировки нейтральные молекулы NO, N<sub>2</sub>O, NO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> диссоциируют на поверхности с образованием положительных ионов азота, кислорода, начинающих свое движение по силовым линиям электрического поля в сторону катода, и радикалов кислорода, которые активно взаимодействуют со свободными поверхностными связями углеводородов. Окисление органических загрязнений носит цепной характер, при этом реакции, по-видимому, протекают по следующей схеме [8]:



где  $R$  и  $\dot{R}$  – фрагменты и радикалы молекул органических загрязнений;  $R'$  и  $R''$  – радикалы, производные от  $R$ , образующиеся в процессе разложения молекул загрязнений. В результате реакций подобного рода происходит разложение пленки органических загрязнений на отдельные фрагменты с небольшой молекулярной массой и последующее окисление этих фрагментов с образованием газообразных соединений CO, CO<sub>2</sub>, а также паров воды H<sub>2</sub>O.

При ускоряющих напряжениях свыше  $U > 1$  кВ процесс удаления органических загрязнений будет протекать по механизму ионно-химического травления (ИХТ), также подробно описанного в работах [3, 4]. Однако следует отметить, что при длительностях облучения до 50 секунд, токах разряда до 10 мА и ускоряющих напряжений до 3 кВ температура подложки, как следует из экспериментальной зависимости, представленной на рис. 1, не превышает 360 К. Следовательно, адсорбция нейтральных молекул на поверхности возможна, и механизм ионно-химического травления загрязнений отличается от вышеупомянутого присутствием на поверхности нейтральных молекул NO, N<sub>2</sub>O, NO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, являющихся источниками образования химически активных радикалов кислорода. Таким образом, кроме механизма ИХТ, описанного в работах [3, 4], удаление загрязнений будет происходить за счет механизмов ионно-стимулированного травления (ИСТ) и электронно-стимулированного радикального травления (ЭСТ). Основными процессами удаления 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;



Рис. 1. Экспериментальная зависимость температуры подложки от ускоряющего напряжения: 1) -  $I=1\text{ mA}$ ; 2)  $I=2\text{ mA}$ ; 3)  $I=3\text{ mA}$ ; 4)  $I=4\text{ mA}$ ; 5)  $I=5\text{ mA}$ ; 6)  $I=6\text{ mA}$ ; 7)  $I=7\text{ mA}$ ; 8)  $I=8\text{ mA}$ ; 9)  $I=9\text{ mA}$ ; 10)  $I=10\text{ mA}$ ; время облучения  $t=50\text{ c}$

- химическое травление радикалами кислорода, образованными за счет диссоциации нейтральных молекул вследствие их электронного удара.

Физическое распыление частиц органических загрязнений приводит к образованию ненасыщенных валентных связей, обладающих высокой химической активностью, что еще больше интенсифицирует протекание химических реакций.

Из работ [8, 9] известно, что при облучении углеводородов потоками плазмы они способны к полимеризации. Кроме того, скорость полимеризации пропорциональна температуре, при которой протекает процесс [10]. Вследствие полимеризации происходит объединение молекул органических загрязнений в длинные цепи и сшивание цепей между собой. Упрочнение межмолекулярных связей препятствует удалению частиц органических загрязнений с поверхности подложки и замедляет процесс её очистки. Согласно [10] наиболее эффективно полимеризация начинает протекать при температурах  $400\text{ K}$  и выше. При температурах же процесса  $360\text{ K}$  и менее скорость полимеризации не превышает  $0,96\%/ч$ , следовательно, процессами полимеризации в настоящей работе можно пренебречь. Тогда суммарная скорость удаления загрязнений определяется скоростями указанных выше процессов.

### Основные выражения и экспериментальные результаты

Чистоту поверхности будем определять в виде зависимости величины изменения поверхностной концентрации загрязнений от скорости удаления загрязнений ( $V_{et}$ ) и длительности облучения ( $t$ ):

$$C_d = C_{(0)d} - V_{et} \rho t, \quad (2)$$

где  $C_{(0)d} = h \cdot \rho$  – первоначальная концентрация загрязнений на поверхности;  $h$  – толщина пленки загрязнений;  $\rho$  – плотность загрязнений. Величину  $V_{et}$  предлагается представить в виде суммы скоростей:

$$V_{et} = V_{iht} + V_{ist} + V_{est}, \quad (3)$$

где  $V_{iht}$  – скорость ионно-химического травления загрязнений;  $V_{ist}$  – скорость ионно-стимулированного радикального травления;  $V_{est}$  – скорость электронно-стимулированного радикального травления загрязнений. Скорость ионно-химического травления с учетом присутствия на поверхности нейтральных молекул, согласно [3] равна:

$$V_{iht} = \left( \frac{B(k_1 + k_3)M}{\rho N_A} \right) \times \left| \exp\left( \frac{U - U_{gr}}{U} \right) - 1 \right| \times J_i^- \theta, \quad (4)$$

где  $B$  – значение штрафной функции, полученной из натурального эксперимента, являющееся константой;  $k_1, k_3$  – коэффициенты плазмохимического травления и физического распыления;  $M$  – молярная масса органических загрязнений;  $U_{gr}$  – напряжение на электродах газоразрядного устройства, при котором энергия иона в момент подлета его к поверхности обработки находится на границе энергий плазмохимического и ионно-химического травления;  $J_i^-$  – поток отрицательных ионов на подложку;  $\theta$  – степень заполнения поверхности активными частицами. Величину  $J_i^-$  рассчитаем по формуле [3]:

$$J_i^- = \left( 1 - \frac{d}{d_{max}} \right) \frac{I}{q e S_K} \times \left( 1 - \frac{\gamma_e \eta}{1 + \gamma_e} \exp\left[ (\alpha - \alpha_n) d_{max} \right] \right), \quad (5)$$

где  $(1 - d/d_{max})$  – множитель, численно характеризующий долю ионов от общего потока, достигших поверхности образца и принимающих участие в его травлении при условии, что  $d_{max} > d$ , где  $d_{max}$  – максимальное расстояние, на которое распространяется ионно-плазменный поток,  $d$  – расстояние до подложки;  $S_K$  – площадь катода;  $q$  – геометрическая прозрачность сетчатого анода;  $\gamma_e, \alpha, \alpha_n$  – коэффициенты вторичной эмиссии, ионизации и прилипания. Химически активные радикалы кислорода рождаются на поверхности в результате диссоциации четырех видов молекул:  $\text{NO}, \text{N}_2\text{O}, \text{NO}_2, \text{O}_2$ . Следовательно, суммарная степень заполнения поверхности активными частицами равна:

$$\theta = \theta_{NO} + \theta_{N_2O} + \theta_{NO_2} + \theta_{O_2}. \quad (6)$$

В отсутствии в плазме пассивирующих частиц [3] величины  $\theta_{NO}, \theta_{N_2O}, \theta_{NO_2}, \theta_{O_2}$  можно представить в следующем виде:

$$\theta_{NO} = \frac{1}{\left[ 1 + \frac{(k_1 + k_2^{NO}) J_i^-}{s_a J_n^{NO}} \right]},$$

$$\theta_{NO_2} = \frac{1}{\left[ 1 + \frac{(k_1 + k_2^{NO_2}) J_i^-}{s_a J_n^{NO_2}} \right]},$$

$$\theta_{N_2O} = \frac{1}{\left[1 + \frac{(k_1 + k_2^{N_2O}) J_i^-}{s_a J_n^{N_2O}}\right]},$$

$$\theta_{O_2} = \frac{1}{\left[1 + \frac{(k_1 + k_2^{O_2}) J_i^-}{s_a J_n^{O_2}}\right]}, \quad (7)$$

где  $k_2^{NO}, k_2^{N_2O}, k_2^{NO_2}, k_2^{O_2}$  – коэффициенты десорбции молекул NO, N<sub>2</sub>O, NO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, рассчитываемые по методике [9]:

$$k_2^i = \frac{3}{4\pi^2} \beta_i \frac{4mM_i}{(m + M_i)^2} \frac{E_n}{E_{sv}}, \quad (8)$$

где  $\beta_i$  – безразмерный параметр, зависящий от отношения масс падающего иона ( $m$ ) и частицы-мишени  $i$ -го сорта молекул ( $M_i$ );  $E_n$  – энергия иона при подлете его к поверхности;  $J_n^{NO}, J_n^{N_2O}, J_n^{NO_2}, J_n^{O_2}$  – потоки нейтральных молекул на поверхность подложки, рассчитываемые по методикам [8]. Суммарный коэффициент физического распыления рассчитывается по формуле:

$$k_3 = k_3^C + k_3^H, \quad (9)$$

где  $k_3^C, k_3^H$  – коэффициенты физического распыления атомов углерода и водорода, рассчитываемые по формуле (8).

С учетом сделанных выкладок скорость ионно-стимулированного травления определяется по формуле [11]:

$$V_{ist} = \frac{Bk_i^* k_1 M}{\rho N_A} J_i^- \theta, \quad (10)$$

где  $k_i^*$  – безразмерный коэффициент ионно-стимулированного травления. По аналогии с (10) скорость электронно-стимулированного травления запишем в виде [12]:

$$V_{est} = \frac{Bk_e^* k_1 M}{\rho N_A} J_e \theta, \quad (11)$$

где  $k_e^*$  – безразмерный коэффициент электронно-стимулированного травления;  $J_e$  – поток электронов на поверхность подложки, рассчитываемый по выражению [3]:

$$J_e = \frac{I\gamma_e\eta}{eqS_k(1+\gamma_e)} \exp[(\alpha - \alpha_n)d_{max}]. \quad (12)$$

Совершая подстановки (9) в (4), (4), (10), (11) в (3) и делая преобразования, получим окончательное выражение для определения суммарной скорости удаления органических загрязнений:

$$V_{et} = \frac{BM}{\rho N_A} \left[ (k_1 + k_3^C + k_3^H) \times \left| \exp\left(\frac{U - U_{gr}}{U}\right) - 1 \right| J_i^- + k_i^* k_1 J_i^- + k_e^* k_1 J_e \right] \theta. \quad (13)$$

Таким образом, выражение для нахождения величины изменения поверхностной концентрации органических загрязнений с учетом выражений (3), (13) примет следующий вид:

$$C_d = \rho h - \frac{BM}{N_A} \left[ (k_1 + k_3^C + k_3^H) \times \left| \exp\left(\frac{U - U_{gr}}{U}\right) - 1 \right| J_i^- + k_i^* k_1 J_i^- + k_e^* k_1 J_e \right] \theta t. \quad (14)$$

На рис. 2, 3, 4 приведены экспериментальные зависимости поверхностной концентрации органических загрязнений после очистки подложек в плазме от технологических факторов: ускоряющего напряжения, длительности облучения, тока разряда.

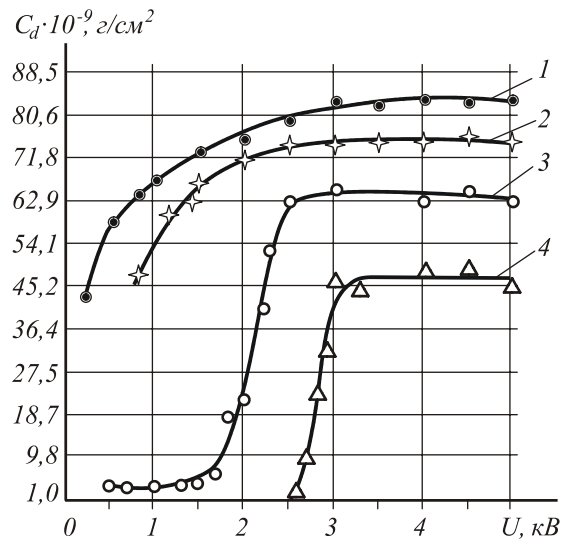


Рис. 2. Зависимость степени чистоты поверхности подложки от ускоряющего напряжения: 1 – 0,5 мА; 2 – 1 мА; 3 – 2 мА; 4 – 3 мА;  $t = 10$  с

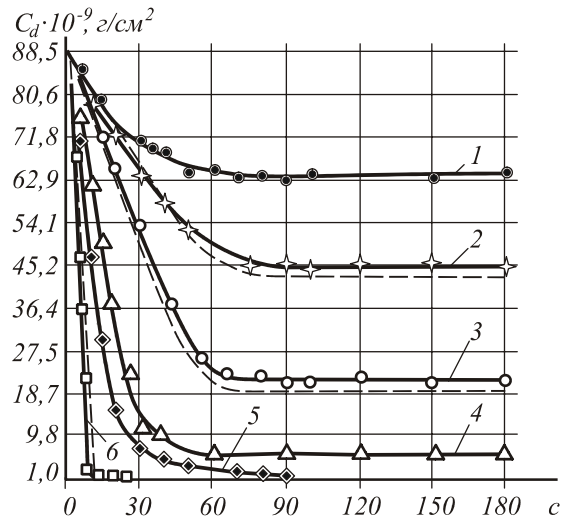


Рис. 3. Зависимость степени чистоты поверхности подложки от длительности облучения: 1 – 0,5 мА ( $t_{lim} = 65$  с); 2 – 1 мА ( $t_{lim} = 60$  с); 3 – 1,4 мА ( $t_{lim} = 50$  с); 4 – 1,5 мА ( $t_{lim} = 30$  с); 5 – 2,6 мА ( $t_{lim} = 20$  с); 6 – 3 мА ( $t_{lim} = 10$  с);  $U = 3$  кВ; штриховыми линиями показана зависимость (14)

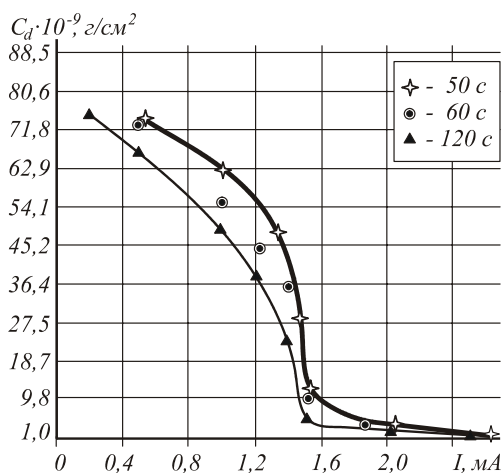


Рис. 4. Зависимость степени чистоты поверхности подложки от тока разряда:  $U = 3$  кВ

Анализ кривых, представленных на рис. 2, показывает, что в зависимости от величины тока разряда на поверхности, в зоне обработки могут протекать два вида процессов. В диапазоне малых значений тока разряда ( $0,5 \leq I \leq 1$  мА, кривые 1, 2) в плазме наблюдается дефицит отрицательных ионов кислорода, вследствие малой концентрации нейтральных молекул рабочего газа. При  $0,5 \leq I \leq 1$  мА во всем диапазоне ускоряющих напряжений длина свободного пробега заряженных частиц достигает поверхности подложки [2]. Отрицательные ионы  $O^-$  взаимодействуют с слоем органических загрязнений с энергиями, практически равными  $eU$ . Высокоэнергетичные ионы  $O^-$  подвергают поверхность интенсивному физическому распылению. Наряду с этим их потока на поверхность, а также потока нейтральных молекул, недостаточно для образования необходимого количества химически активных радикалов кислорода, способных интенсифицировать химические реакции. Скорость физического распыления значительно преобладает над скоростью химических реакций. Распыленные модифицированные атомно-молекулярные комплексы органических загрязнений адсорбируются обратно на поверхность и загрязняют её. С ростом ускоряющих напряжений энергии частиц, бомбардирующих поверхность, только увеличиваются, повышается число распыленных атомов, которые вследствие дефицита активных радикалов  $O^*$ , в основной своей массе не вступают в химические реакции и тем самым увеличивают поверхностную концентрацию загрязнений. Именно этим объясняется одинаковое поведение кривых 1, 2 и рост величины  $C_d$  во всем диапазоне ускоряющих напряжений. Однако кривая 2 лежит ниже кривой 1. Это объясняется большим содержанием (при  $I = 1$  мА) в плазме отрицательных ионов кислорода, нейтральных молекул рабочего газа, уменьшением энергий частиц, бомбардирующих поверхность, и, как следствие, увеличением химически активных частиц (ХАЧ) на поверхности. ХАЧ вступают с атомно-молекулярными комплексами загрязнений в

химические реакции и препятствуют процессам их физического распыления, уменьшая  $C_d$ .

Сделанные утверждения подтверждает анализ кривых 3, 4. При значениях тока разряда  $I \geq 2$  мА химически активных частиц на поверхности достаточно для протекания процессов ионно-химического, ионно-стимулированного, электронно-стимулированного травления (ИХТ, ИСТ, ЭСТ) органических загрязнений. Скорость химических реакций соизмерима или превышает скорость физического распыления органических загрязнений. Именно этим объясняются минимальные значения  $C_d$  в диапазонах напряжений  $0,5 \leq U \leq 1,5$  кВ (кривая 3) и  $0,5 \leq U \leq 2,5$  кВ (кривая 4). При напряжениях  $1,5 \leq U \leq 2,5$  кВ (кривая 3) и  $2,5 \leq U \leq 3$  кВ (кривая 4) энергия частиц достигает величины, при которой начинают интенсифицироваться процессы физического распыления, и, как следствие, происходит резкое увеличение поверхностной концентрации загрязнений. Участки насыщения кривых 1, 2, 3, 4 характеризуют полное распыление органических загрязнений с поверхности подложки. С увеличением токов разряда требуются прикладывать к электродам газоразрядного устройства большие значения ускоряющего напряжения, чтобы обеспечить доставку заряженных частиц к поверхности с энергиями, достаточными для полного распыления молекул загрязнений. Вследствие этого, насыщение у кривых 1, 2, 3, 4 начинается при разных значениях ускоряющего напряжения. Разные уровни насыщения свидетельствуют о том, что с ростом тока разряда, часть атомно-молекулярных комплексов загрязнений успевает удалиться с поверхности подложки в виде газообразных продуктов за счет механизмов ИХТ, ИСТ, ЭСТ откачными системами.

Для выбора оптимального режима очистки поверхности подложек (на основе его исследования во времени) в работе получены экспериментальные зависимости  $C_d = f(t)$ , представленные на рис. 3. Разная крутизна кривых обусловлена разным количеством ХАЧ, принимающих участие в химических реакциях с атомами загрязнений. Малым токам разряда соответствуют малые потоки отрицательных ионов и радикалов кислорода на поверхность, следовательно, для удаления загрязнений требуются большие времена облучения. Необходимо отметить, что в первую очередь, в случае дефицита ХАЧ, радикалы кислорода будут вступать в реакции с химически активными атомами водорода. Удаление химически инертных атомов углерода до значения  $C_d = 10^{-9}$  г/см<sup>2</sup> возможно при устранении дефицита ХАЧ на поверхности подложки. Это, в свою очередь, возможно при токах разряда  $I = 2,6$  мА и  $I = 3$  мА, причем в последнем случае время облучения, при котором достигается  $C_d = 10^{-9}$  г/см<sup>2</sup>, составляет всего 10 секунд. Длительное время облучения при ускоряющих напряжениях свыше 1 кВ приводит к разогреву поверхности подложки до температур, при которых адсорбция на ней нейтральных моле-

кул рабочего газа и, как следствие, образование ХАЧ становятся затруднительными [3]. Каждому значению тока разряда соответствует свое критическое время облучения ( $t_{lim}$ ), при котором происходит нагрев поверхности до температуры десорбции с неё нейтральных молекул. Величина  $\theta \rightarrow 0$  на отрезке  $t \geq t_{lim}$ , уменьшая до нуля скорость удаления органических загрязнений. Именно этим объясняются участки кривых 1, 2, 3, 4 (рис. 3), на которых прекращается зависимость величины  $C_d$  от времени обработки в плазме. Кроме того, данные участки могут, по-видимому, объясняться и наличием на поверхности трудноудаляемого модифицированного слоя углеродных соединений, для удаления которых требуются большие значения токов разряда. Значение  $t_{lim}$  для каждого значения тока разряда определяется в точке пересечения касательных к соответствующей кривой (рис. 3).

Анализ зависимостей  $C_d=f(I)$ , представленных на рис. 4, показывает, что при трех разных значениях длительности очистки резкое уменьшение поверхностной концентрации загрязнений (для всех кривых) наблюдается в диапазоне  $1,4 \leq I \leq 1,6$  мА. Резкое уменьшение величины  $C_d$  в данном интервале токов разряда объясняется интенсивным заполнением поверхности химически активными радикалами  $O^*$ , образованными в результате ионной и электронной стимуляции нейтральных молекул рабочего газа, а также за счет механизма ИХТ [3]. Происходит устранение дефицита ХАЧ на поверхности, характерного для меньших токов разряда ( $I \leq 1,4$  мА, см. также рис. 2).

Полностью дефицит ХАЧ устраняется при  $I \geq 2,6$  мА, что подтверждается достижением минимального значения  $C_d$ . Таким образом, в настоящей работе рекомендуется для достижения прецизионного уровня чистоты осуществлять очистку поверхности диэлектрических подложек в плазме воздуха газового разряда высоковольтного типа в следующих режимах:  $U=2 \div 3$  кВ,  $I=3$  мА,  $t=10$  с. Для сравнения на рис. 3 приведены также расчетные зависимости, полученные с помощью выражения (14). Хорошее соответствие расчетных кривых экспериментальным данным показывает, что разработанная модель адекватно описывает физический процесс очистки поверхности диэлектрических подложек от органических загрязнений в плазме газового разряда высоковольтного типа.

Эксперимент по ионно-химическому травлению диоксида кремния в плазме  $CF_4/O_2$  газового разряда высоковольтного типа показал возможность формирования в такой плазме, с применением разработанной в настоящей работе методики очистки поверхности диэлектрических подложек, микрорельефа, представленного на рис. 5. Микрорельеф является равномерным и однородным по всей площади поверхности подложки, без какого-либо проявления эффекта подтравливания с вертикальным профилем

стенок, что достигается прецизионным уровнем чистоты поверхности, обеспечиваемым данной методикой очистки.

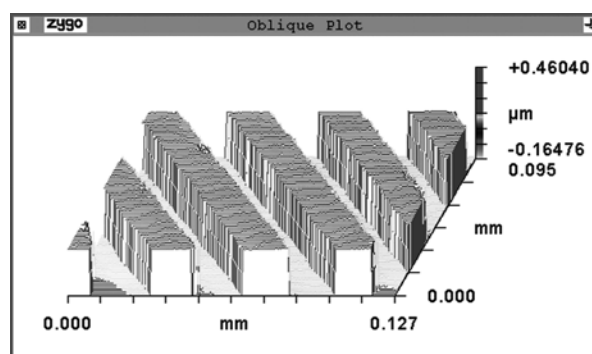


Рис. 5. Вид микрорельефа на диоксиде кремния, полученного с применением разработанной методики очистки (режим травления:  $I=120$  мА;  $U=2$  кВ; время травления - 70 с)

### Заключение

В настоящей работе теоретически и экспериментально исследован механизм очистки поверхности диэлектрических подложек в низкотемпературной плазме воздуха газового разряда высоковольтного типа. В результате проведенных исследований установлено влияние на чистоту поверхности диэлектрических подложек времени облучения в плазме, тока разряда, ускоряющего напряжения. Прецизионные значения чистоты поверхности достигаются при времени облучения 10 секунд, токе разряда 3 мА, ускоряющих напряжениях  $2 \div 3$  кВ. Получена аналитическая зависимость, связывающая величину поверхностной концентрации загрязнений с физическими параметрами (время облучения, ток разряда, ускоряющее напряжение), адекватная физическому процессу.

### 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. Дюваль П. Высоковакуумное производство в микроэлектронной промышленности // М.: Мир, 1992. 262 с.
2. Колпаков А.И., Колпаков В.А., Кричевский С.В. Ионно-плазменная очистка поверхности контактов реле малой мощности // Электронная промышленность, 1996. № 5. С. 41-44.
3. Колпаков В.А. Моделирование процесса травления диоксида кремния в плазме газового разряда высоко-

- вольтного типа // Микроэлектроника, 2002. Т. 31. № 6. С. 431-440.
4. Казанский Н.Л., Колпаков В.А., Колпаков А.И. Исследование особенностей процесса анизотропного травления диоксида кремния в плазме газового разряда высоковольтного типа // Микроэлектроника, 2004. Т.33. №3. С.218-233.
  5. Пиганов М.Н., Колпаков А.И., Кричевский С.В. Устройство экспресс контроля чистоты поверхности подложек трибометрическим методом // Тезисы докладов международной научно-технической конференции «Перспективные технологии в средствах передачи информации». Владимир. 1995. С. 155-157.
  6. Колпаков 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. Полтавцев Ю.Г., Князев А.С. Технология обработки поверхностей в микроэлектронике // Киев: Тэхника, 1990. 206 с.
  8. Ивановский Г.Ф. Петров В. И. Ионно-плазменная обработка материалов // М.: Радио и связь, 1986. 232с.
  9. Броудай И. Мерей Дж. Физические основы микротехнологии: перевод с английского // М.: Мир, 1985. 496 с.
  10. Анисимов Ю.Н., Галибей В.И., Иванченко П.А. и др. Процессы полимеризации и физико-химические методы исследования // К.: Вища шк. Головное изд-во, 1987. 159 с.
  11. Киреев В.Ю., Назаров Д.А., Кузнецов В.И. Ионно-стимулированное травление // Электронная обработка материалов, 1986. № 6. С. 40-43.
  12. Киреев В.Ю., Кремеров М.А. Электронно-стимулированное травление // Электронная техника, Микроэлектроника. 1985. В.151. С. 3-12