

# ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАСТЕКАНИЯ КАПЛИ ЖИДКОСТИ, НАНОСИМОЙ НА ПОВЕРХНОСТЬ ПОДЛОЖКИ

С.А. Бородин

Институт систем обработки изображений РАН

Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева

## Аннотация

В данной работе предлагается модель процесса растекания капли жидкости по поверхности подложки, основанная на балансе потенциальной энергии падающей капли, энергии поверхностного натяжения и энергии связи молекул жидкости и твердого тела. Полученные экспериментальным путем зависимости радиуса основания капли и длительности процесса растекания от степени чистоты и шероховатости поверхности подложки, очищенной методом плазмохимического травления, удовлетворительно совпадают с расчетными зависимостями.

## Введение

При формировании микрорельефа дифракционных оптических элементов немаловажным фактором является оценка степени чистоты материала подложки, на поверхности которой формируется микрорельеф. Наиболее приемлемым методом оценки степени чистоты является метод, базирующийся на использовании явления смачиваемости подложки каплями жидкости, наносимой на ее поверхность. Капля жидкости, растекающаяся по поверхности твердой подложки, является особым физическим объектом, форма и структура которого определяется составом жидкости, условиями внешней среды и свойствами поверхности подложки [1]. При неизменных условиях окружающей среды и составе жидкости динамику процесса растекания капли определяют следующие факторы: поверхностное натяжение, смачивание, вязкость, теплопроводность, ионные связи. При этом необходимо учитывать следующие факторы:

- 1) действие силы тяжести, расплющивающее каплю;
- 2) действие собственного поверхностного натяжения, сжимающего каплю;
- 3) действие поверхностного натяжения на границе капля - твердая поверхность, которое способствует некоторой деформации капли.

Поверхность жидкости, как известно, обладает повышенной энергией, так как поверхность есть совокупность большого количества разорванных атомно-молекулярных связей. Энергетически существование разорванных связей не выгодно, и они замыкаются друг на друга, тем самым несколько понижая поверхностную энергию. Наличие адсорбированных пленок воздуха на поверхности жидкости и очищенной поверхности также снижает поверхностную энергию. Для создания условий растекания капли жидкости по поверхности подложки, необходимо разрушить (активировать) спаренные молекулярные связи или разрушить молекулярную пленку воздуха, для чего необходимо совершить некоторую работу.

Поскольку процесс разрушения связей является стохастическим, связанным с флуктуациями энергии молекул, то этот процесс занимает определенное время. Именно по этой причине капля растекается по поверхности с определенной скоростью.

## 1. Модель растекания капли

При падении капли жидкости на очищенную поверхность подложки с высоты  $H$ , она запасает потенциальную энергию. При растекании капли эта энергия преобразуется в энергию активации, необходимую для разрушения пленки адсорбированного воздуха или активации спаренных молекулярных связей, и в энергию поверхностного натяжения [2]. Задачей данного исследования является оценка влияния энергии активации молекулярных связей  $Q$ , образующихся при растекании капли по поверхности, на скорость растекания капли по поверхности подложки. Полагая, что контакт капли жидкости с поверхностью подложки происходит на площади  $S = \pi R^2$ , где  $R$  – радиус растекающейся капли, а количество молекулярных связей для идеально гладкой поверхности  $N = S/a^2$ , где  $a$  – площадь, приходящаяся на одну связь ( $a \approx 2 \cdot 10^{-10}$  м), для шероховатой поверхности эту энергию можно определить как:

$$Q = \Delta Q \cdot N = \Delta Q \cdot \pi R^2 / k\theta \cdot a^2,$$

где  $N$  – число молекул на поверхности контакта капли с подложкой;  $\Delta Q$  – энергия активации одной молекулярной связи;  $\theta$  – степень покрытия молекулярными связями площади  $S$ ;  $k = S_{\text{шер}}/S$  – коэффициент пропорциональности, учитывающий шероховатость поверхности;  $S_{\text{шер}}$  – реальная площадь контакта жидкости с поверхностью подложки с учетом ее шероховатости.

Степень покрытия обычно определяется как отношение концентрации частиц адсорбата (в атомах на квадратный сантиметр) к концентрации частиц адсорбента так, что покрытие в один молекулярный слой ( $\theta = 1$ ) отвечает одному адсорбированному атому на каждый атом подложки [3]. В случае растекания жидкости по очищенной и шероховатой поверхности, степень чистоты поверхности можно определять степенью покрытия умноженную на коэффициент пропорциональности.

Зная высоту падения капли  $H$  и массу  $m$ , можно оценить потенциальную энергию капли

$$W = mgH.$$

Массу капли, формируемой на конце иглы с внутренним диаметром  $d$ , можно определить, поль-

зуюсь известным уравнением равновесия капли в момент стекания с кончика иглы [4]:

$$\sigma = mg / \pi d ,$$

где  $\sigma$  – поверхностное натяжение жидкости,  
 $g=9,81$  м/с<sup>2</sup> – ускорение свободного падения,  
 $d$  – диаметр иглы, с которой капает жидкость,  
 $m$  – масса капли жидкости.

Отсюда находим:

$$m = \frac{\sigma \pi d}{g} . \quad (1)$$

После падения капли эта энергия идет на увеличение поверхностной энергии  $\Delta E$ , растекшейся по поверхности капли жидкости, и на разрушение спаренных молекулярных связей  $Q$  или адсорбированного слоя воздуха:

$$W = \Delta E + Q ,$$

где  $\Delta E = \sigma \cdot \Delta S$ ,  $\Delta S$  – изменение площади поверхностного слоя, которое определяется по формуле:

$$\Delta S = S_{\text{сез.}} - S_{\text{кан.}} ,$$

где  $S_{\text{сез.}}$  – площадь поверхности капли, представленной в виде сегмента шара,  $S_{\text{кан.}}$  – площадь поверхности той же капли, но в форме шара.

$$S_{\text{сез.}} = \pi(R^2 + h^2) ,$$

где  $R$  – радиус основания сегмента,  $h$  – высота сегмента.

$$S_{\text{кан.}} = 4\pi r^2 ,$$

где  $r$  – радиус капли в форме шара.

Учитывая равенство объемов капли в форме шара и растекшейся капли, и то, что  $R$  много больше  $h$ , получаем:

$$\Delta S = \pi R^2 - 4\pi r^2 .$$

Тогда,

$$mgH = \sigma(\pi R^2 - 4\pi r^2) + \frac{\Delta Q \cdot R^2}{k\theta a^2}$$

Выражаем  $m$  из (1), а  $r$  из формулы

$$m = \frac{4}{3} \pi r^3 \rho .$$

Получим зависимость величины радиуса основания капли от степени чистоты и шероховатости поверхности:

$$R = \sqrt{\frac{\sigma \left( dH + 4 \cdot (3\sigma d / 4\rho g)^{2/3} \right) \cdot 4k\theta a^2}{(16k\theta\sigma \cdot a^2 + \Delta Q)}}$$

Зависимость времени растекания от степени чистоты и шероховатости поверхности:

$$T = \sqrt{\frac{\sigma \left( dH + 4 \cdot (3\sigma d / 4\rho g)^{2/3} \right) \cdot 4k\theta a^2}{(4k\theta\sigma \cdot a^2 + 4\Delta Q) \cdot 2gH}}$$

При растекании жидкости по поверхности очищенной подложки происходит замещение адсорбированных на поверхности молекул газов воздуха и паров H<sub>2</sub>O. При этом потенциальная энергия капли перейдет в энергию активации  $Q$  процесса адсорбции жидкости с поверхностью. Эта энергия численно равна энергии поверхностного натяжения. В этом случае радиус растекания будет максимальным

$$R_{\text{max}} = \sqrt{\left( dH + 4 \cdot (3\sigma d / 4\rho g)^{2/3} \right) \cdot H} . \quad (2)$$

Таблица исходных данных для расчета радиуса основания капли и времени растекания капли [5, 6].

Таблица 1

$\sigma$ (н/м)	$d$ (м)	$H$ (м)	$\rho$ (кг/м <sup>3</sup> )
$72 \cdot 10^{-10}$	$1,2 \cdot 10^{-1}$	$15 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^3$

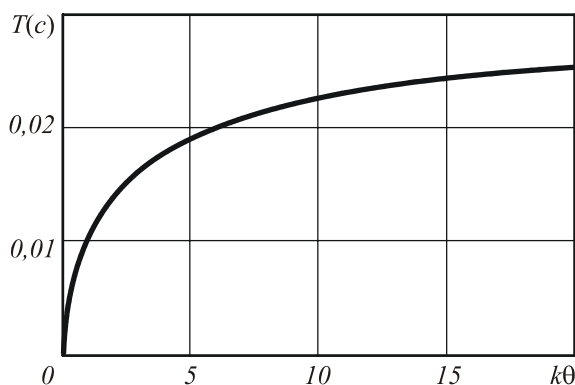


Рис. 1. График зависимости величины радиуса основания капли от степени чистоты и шероховатости поверхности

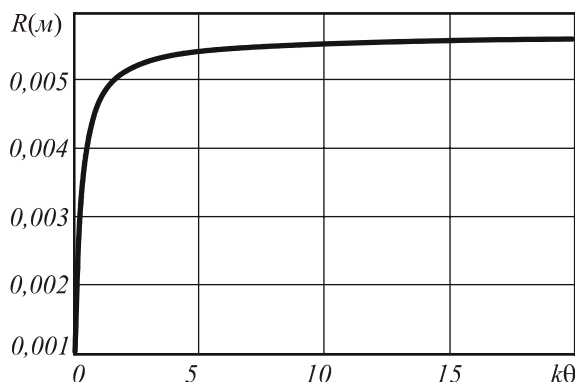


Рис. 2. График зависимости времени растекания от степени чистоты и шероховатости поверхности

Из графиков видно, что при значении степени покрытия  $\theta = 0$  (то есть, нет ни одной активной связи), поверхность не смачивается,  $R=0$ . Участок  $0 < \theta < 1$ , характеризуется активацией всех возможных для данной площади молекулярных связей. При  $\theta \approx 1$  радиус  $R$  близок к максимальному значению. При значениях  $k\theta > 1$  происходит нарастание концентрации активных молекулярных связей. Радиус основания увеличивается незначительно, а время растекания продолжает расти пропорционально степени покрытия активными молекулами площади связи.

## 2. Методика проведения эксперимента

В качестве исследуемых образцов использовали подложки типа СТ-50-1. Очистка исследуемых подложек осуществлялась этиловым спиртом, кипячением в растворе серной кислоты с хромом по стандартной технологии, на установке плазмохимического травления пластин УПТ ПДЭ – 125-008 смесью азота 80% и кислорода 20% под давлением  $2,1 \cdot 10^{-1}$  Па в течение 4-х минут, мощность Р генератора – 500 Ватт.

## 3. Технология проведения эксперимента

На поверхность подготовленной подложки (сразу после очистки) с помощью дозатора жидкости наносили каплю дистиллированной воды. Процесс ее падения и растекания по поверхности фиксировался скоростной видеокамерой со скоростью 1000 кадров в секунду. Фрагменты изображения растекания капли воды по поверхности ситалловой подложки типа СТ-50, очищенной плазмохимическим травлением (ПХТ), представлены на рис. 3.

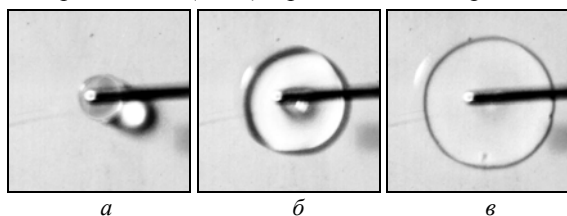


Рис. 3. Этапы процесса растекания капли воды по поверхности ситалловой подложки:  
а) капля касается поверхности подложки, б) время растекания 7 мс, в) время растекания 11 мс

## 4. Результаты эксперимента

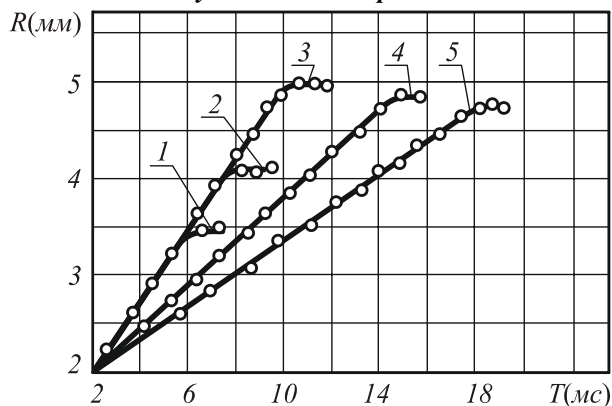


Рис. 4. График зависимости радиуса основания капли от времени растекания капли по поверхности подложки:  
1) время очистки 30 с, 2) время очистки 2 мин, 3) время очистки 3 мин, 4) время очистки 4 мин, 5) время очистки 6 мин

Из экспериментально полученного графика растекания капли дистиллированной воды по поверхности ситалловой подложки типа СТ-50-1 видно, что на участке  $T < 10$  мс концентрация молекулярных связей растет пропорционально времени очистки поверхности. Для  $T = 10$  мс и времени очистки порядка 3 минут все молекулярные связи на площади растекания капли активированы, и радиус растекания достигает максимального значения 5,6 мм. По формуле (2)  $R_{max} = 5,78$  мм. При времени очистки более 3 минут

радиус растекания незначительно уменьшается, а время растекания продолжает увеличиваться. Это объясняется тем, что концентрация активных молекулярных связей увеличивается за счет роста шероховатости поверхности. Шероховатость поверхности подложек измерена с помощью автоматизированного профилометра типа WLI DMR.

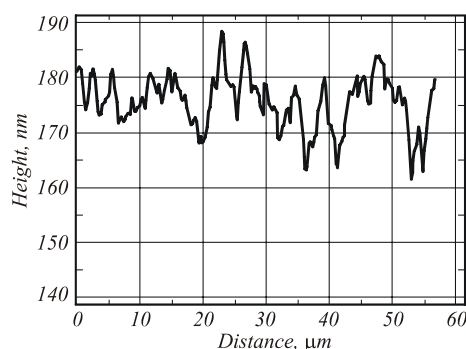
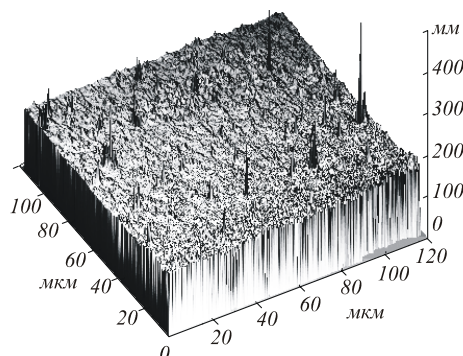


Рис. 5. Рельеф и профилограмма поверхности неочищенных подложек

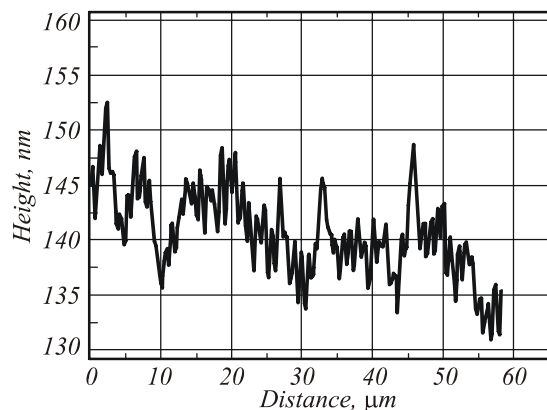


Рис. 6. Профилограмма поверхности подложки, очищенной ПХТ в течение 4-х минут

Профилограмма поверхности ситалловой подложки типа СТ-50, очищенной плазмохимическим травлением в течение 4-х минут, показывает, что высота неровностей профиля немного уменьшилась, а шаг неровностей профиля сократился в несколько раз.

## Заключение

Предложенная модель процесса растекания капли жидкости по шероховатой поверхности дает возможность рассчитать основные параметры процесса: максимальный радиус растекания и минимальное время растекания. Контроль этих параметров позво-

ляет оптимизировать технологический процесс очистки поверхности подложек.

#### ***Благодарность***

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 гранта Президента РФ № НШ-1007.2003.01 и гранта РФФИ № 04-02-08094.

#### ***Литература***

1. Адамсон А. Физическая химия поверхностей // М.: «Мир», 1979. 568 с.
2. Матвеев А.Н. Молекулярная физика // Учебное пособие. М.: «Высшая школа», 1981. 400 с.
3. Зенгуил Э. Физика поверхности // М. Мир, 1990. 537 с.
4. Гегузин Я.Е. Пузыри // Библиотека журнала «Квант», 1988.
5. Яворский Б.М., Детлаф А.А. Справочник по физике // М: «Наука», 1970.
6. Мищенко К.П., Равделя А.А. Краткий справочник физико-химических величин // Л.: «Химия» Ленинградское отделение, 1974.