

Н.Н. Григорьев, М.Ю. Кравецкий, Г.А. Пащенко, С.А. Сыпко, А.В. Фомин

## ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ БЕСКОНТАКТНОМ ХИМИКО-МЕХАНИЧЕСКОМ ПОЛИРОВАНИИ ПЛАСТИН

*Институт физики полупроводников НАН Украины,  
Проспект науки, 45, Киев-28, 03028, Украина*

### **Введение**

Химическое жидкостное полирование широко используется в электронной технике для получения плоских поверхностей [1–3]. Практически для каждого применяемого в технике материала разработаны конкретные травители и режимы травления. Из-за сложности физических процессов и многообразия технологических приемов полирования в литературе имеется небольшое количество работ, посвященных разработке физических и аналитических моделей процесса полирования металлов, полупроводников и диэлектриков [4–7]. Поэтому технология химико-механического жидкостного полирования является скорее искусством, чем наукой, так как отсутствует единый аналитический подход, позволяющий указать зависимость между физическими параметрами протекающих процессов. Ниже предлагается простая схема технологического эксперимента, которая позволяет связать профиль поверхности после полирования с физическими параметрами процессов, протекающими при полировании.

### **Методика эксперимента**

Обрабатываемый образец находился в кассете, которая обеспечивала возможность движения образца в вертикальном направлении. Для ограничения доступа травителя к боковым граням образец изготавливался таким, что он целиком заполнял гнездо в кассете-держателе. Образец в кассете перед началом эксперимента шлифовали до совпадения плоскости образца с плоскостью полировальника (конструкция кассеты позволяла сохранить первоначальную плоскопараллельность образца), а затем устанавливали на полировальник на расстоянии от центра вращения, намного превышающем линейные размеры образца. В процессе обработки кассета с образцом оставалась неподвижной на вращающемся полировальнике.

При вращении полировальника между ним и образцом появляется зазор, заполненный травителем. Величина зазора и ее зависимость от линейной скорости полировальника оценивалась измерением электрического сопротивления слоя жидкости между полировальником и плоской металлической пластиной, вмонтированной в кассету вместо образца.

### **Эксперимент и результаты эксперимента**

Ниже будет показано, что динамика формообразования поверхности разных материалов при их полировании по данной методике (для реакций растворения первого порядка) имеет общий характер. Поэтому в работе приводятся результаты исследования на монокристаллических пластинах NaCl, поскольку этот материал доступен и травильный раствор для его обработки не токсичен. В качестве растворяющего реагента применяли смесь воды и этилового спирта в пропорции 3:7, обеспечивающей сравнительно медленное растворение кристалла (опыты по измерению кинетических характеристик растворения при разной концентрации активной компоненты показывают линейную зависимость скорости растворения NaCl от концентрации воды); все эксперименты проводились при комнатной температуре.

Проведенные измерения электрического сопротивления между образцом и полировальником показывают, что в процессе взаимного перемещения между ними отсутствует прямой контакт – возникает жидкостной зазор. Это является свидетельством того, что в нашем случае имеет место бесконтактное химико-гидродинамическое полирование. С увеличением скорости вращения полировальника происходит увеличение зазора от  $\sim 4$  мкм при скорости движения 3 см/с, до  $\sim 11$  мкм при скорости движения 12 см/с. Увеличение жидкостного зазора объясняется возникновением подъемной (флотационной) силы, которая возрастает с увеличением взаимной скорости перемещения [8]. Количественная оценка характера течения жидкости в зазоре показывает, что для описанных условий движение травителя в зазоре является ламинарным (число Рейнольдса в нашем случае  $\sim 10^{-3}$ ).

Форма поверхности образца контролировалась профилометром-профилографом с точностью до 1 мкм. Профилограммы поверхности образцов снимались вдоль направления движения полировальника. Исследовалась динамика изменения формы поверхности образца при различных скоростях подачи травителя (в нашем случае растворителя) в пространство между обрабатываемой поверхностью и полировальником. На рис. 1, 2 приведены профилограммы исследуемых образцов; здесь ось  $X$  параллельна плоскости полировальника и совпадает с направлением полирования, по оси  $Y$  отложены величины отклонения профиля образца от горизонтали.

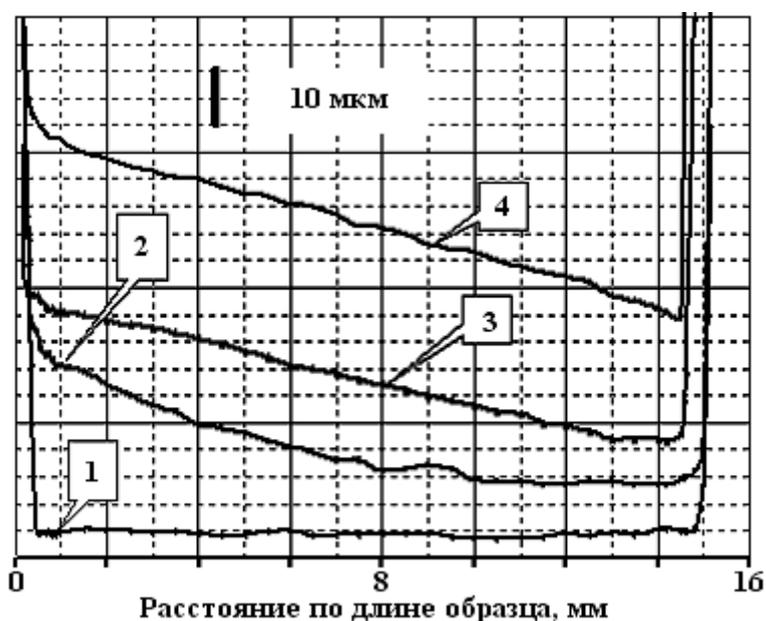


Рис. 1. Профилограммы поверхности образца, измеренные вдоль направления полирования при скорости движения  $U = 5$  см/с: 1 – исходная поверхность, шлифованная параллельно плоскости полировальника; 2 – после 1 мин. Полирования; 3 – после 2 мин. Полирования; 4 – после 4 мин. полирования (расстояние между профилограммами – произвольное).

На рис.1 представлена динамика изменения поверхности образца при скорости движения полировальника 5 см/с. Для наглядности профилограммы, которые соответствуют различным временам травления образца, разнесены вдоль оси  $Y$ . Кривая 1 соответствует исходной поверхности образца, которая была шлифована к поверхности полировальника. Из рисунка видно, что травление начинается с передней кромки образца (кривая 2). В начальный момент времени скорость травления максимальна и уменьшается вдоль кристалла. Затем, с увеличением времени полирования (кривая 3) зона активного травления продвигается к концу образца, при этом темп травления вблизи передней кромки уменьшается. В дальнейшем наступает момент (кривая 4), когда образец начинает травиться по всей длине равномерно, с постоянной скоростью – форма поверхности становится стационарной. Для исследуемого материала при скорости движения полировальника 5 см/с стационарная поверхность формируется за  $\sim 2$  мин. При большей скорости (12 см/с) изменение профиля поверхности происходит подобным же образом, однако установление стационарности – быстрее (за  $\sim 1$  мин).

На рис. 2 приведены профилограммы стационарных поверхностей образцов, полученных при скоростях движения полировальника 5 и 12 см/с. Профилограммы состоят из двух участков: началь-

ного нелинейного, короткого, соответствующего краевому “завалу” и длинного, линейного, наклоненного к исходной плоскости образца. Параметры участков изменяются с изменением скорости полирования. При скорости движения полировальника 5 см/с линейный участок профилограммы имеет наклон  $2,3 \cdot 10^{-3}$ , при большей скорости (12 см/с) наклон линейного участка уменьшается до  $0,8 \cdot 10^{-3}$ .

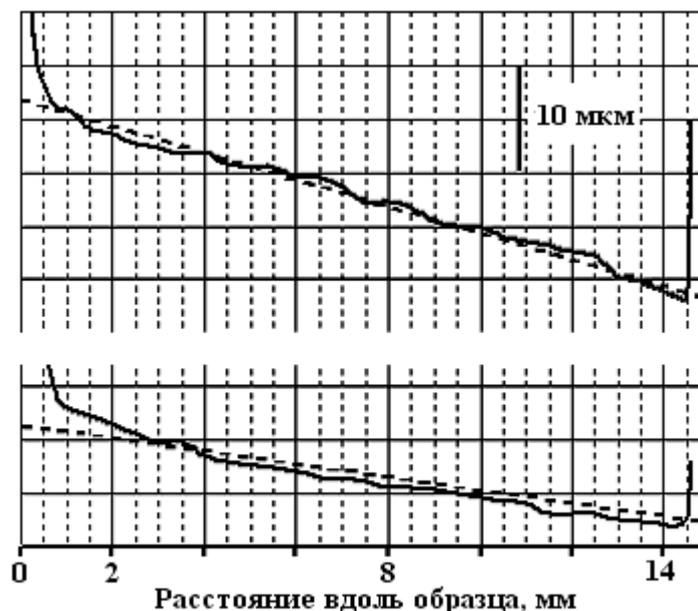


Рис. 2. Профилограммы поверхности образцов, обработанных в стационарном режиме при разных скоростях движения полировальника. Верхняя кривая соответствует скорости движения  $U = 5$  см/с; нижняя –  $U = 12$  см/с. Пунктирные линии соответствуют профилям поверхностей, рассчитанным в соответствии с предлагаемой моделью.

Представление начального участка профилограмм в полулогарифмическом виде позволило сделать вывод, что форму области передней кромки образца (“завал”) можно аппроксимировать экспонентой. Таким образом, форма экспериментальной стационарной поверхности может быть описана уравнением

$$y_s = A^* - B^* x + C^* e^{-kx} . \quad (1)$$

### Модель

Для модельного описания процессов, происходящих при заданных условиях полирования образцов, жесткий полировальник представим в виде бесконечной плоскости, движущейся поступательно с постоянной скоростью  $U$  под поверхностью образца конечной длины  $l$ . Полировальник и образец разделены зазором, полностью заполненным травителем. Часть слоя травителя прилипает к полировальнику и движется с ним, другая часть прилипает к поверхности образца. Предполагается, что оба слоя скользят друг относительно друга без трения и не перемешиваются. Считаем, что движение травителя в зазоре ламинарное. Существенной особенностью полирования в нашем случае является то, что ширина зазора в конечной точке образца в процессе обработки удерживается постоянной.

Активная компонента травителя диффундирует в поперечном направлении через неподвижный слой жидкости к поверхности образца и взаимодействует с ним. Поскольку активная компонента раствора расходуется на травление, ее концентрация вдоль образца уменьшается. В результате начальные участки образца травятся быстрее, и зазор между полировальником и образцом здесь становится больше, чем фиксированный зазор в конце образца. Предполагается, что толщина конвективного слоя постоянна по всей длине образца и равна  $\delta$ . Поэтому более быстрое травление в начале образца приводит к увеличению на входном участке образца толщины диффузионного слоя, что затрудняет доставку активной компоненты к поверхности образца и приводит к уменьшению темпа травления. В результате, по сравнению с предыдущим моментом времени, концентрация активной компоненты увеличивается вдоль зазора и, следовательно, увеличивается темп травления по длине образца. Убывание скорости травления на начальных участках образца и ее увеличение вдоль образца

будут продолжаться до тех пор, пока скорости везде не станут одинаковыми. Начиная с этого момента процесс полирования становится стационарным и устанавливается определенный профиль поверхности.

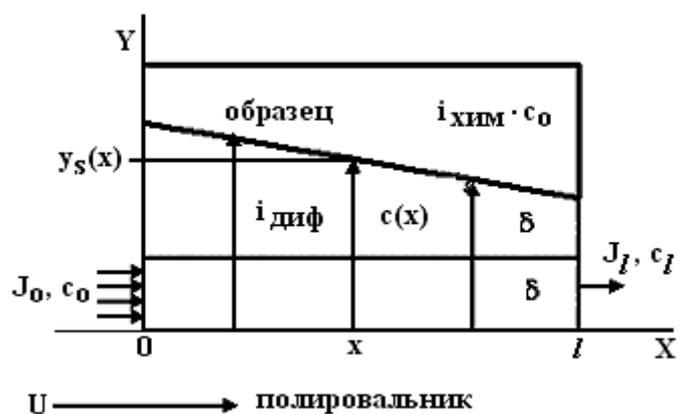


Рис. 3. Схема процесса бесконтактного химико-механического полирования.

На рис. 3 приведена схема процесса полирования в стационарных условиях. Предполагается, что в точке  $x = l$  ширина диффузионного слоя минимальна и равна ширине конвективного слоя, то есть ширина зазора здесь равна  $2\delta$ . В модели полагаем, что в начале образца, так же как и в любой точке вдоль зазора, имеет место только поперечная диффузия (в эксперименте перегородкой, ограничивающей продольную диффузию в начале образца, является стенка кассеты).

Положим концентрацию активной компоненты раствора на входе в зазор равной  $c_0$ , тогда поток активной компоненты травителя, который вносит конвективный слой,  $J_0 = U\delta \cdot c_0$ , а поток компоненты, выходящей из зазора,  $J_l = U\delta \cdot c_l$ , где  $c_l$  — концентрация активной компоненты на выходе из зазора.

В каждой точке  $x$  на границе конвективного и диффузионного слоев концентрация активной компоненты в результате ее расходования на травление будет равна  $c(x)$ . Концентрация в вертикальном направлении будет убывать от значения на границе двух слоев  $c(x)$  до величины  $c_s$  на поверхности образца. Диффузионный поток реагента к поверхности образца в точке  $x$ :

$$j_D = D \frac{c(x) - c_s}{y_s(x) - \delta}, \quad (2)$$

где  $y_s(x)$  — расстояние от полировальника до поверхности образца в точке  $x$  (профиль поверхности). Для случая химической реакции первого порядка с константой реакции  $\alpha$  химический поток в этой точке:

$$j_{\text{хим}} = \alpha c_s. \quad (3)$$

В стационарных условиях убыль реагента вдоль оси  $X$  равна диффузионному потоку активной компоненты травителя к поверхности образца в точке  $x$ :

$$-U\delta \frac{dc(x)}{dx} = j_D = D \frac{c(x) - c_s}{y_s(x) - \delta}. \quad (4)$$

С другой стороны диффузионный поток (2) равен химическому потоку:

$$j_{\text{хим}} = \alpha \cdot c_s = D \frac{c(x) - c_s}{y_s(x) - \delta}, \quad (5)$$

а также

$$-U\delta \frac{dc(x)}{dx} = \alpha \cdot c_s. \quad (6)$$

Решая уравнения (5) и (6) совместно с уравнением материального баланса полных потоков реагента:  $J_0 = J_l + j_{хим} \cdot l$ , то есть:

$$U\delta \cdot c_0 = U\delta \cdot c_l + \alpha \cdot c_s \cdot l \quad (7)$$

и уравнением (5), записанным для конечной точки образца  $x = l$

$$D \frac{c_l - c_s}{\delta} = \alpha \cdot c_s \cdot l \quad (8)$$

относительно  $y_s(x)$ , исключая неизвестные величины  $c(x), c_s, c_l$ , получим

$$y_s(x) = 2\delta + \frac{D}{U\delta} \cdot l - \frac{D}{U\delta} \cdot x = y_s(0) - \frac{D}{U\delta} \cdot x = A - B \cdot x, \quad (9)$$

где  $A = y_s(0) = 2\delta + \frac{D}{U\delta} l$ ,  $B = \frac{D}{U\delta}$ .

### Обсуждение результатов

Сравнение полученного выражения для формы поверхности (9) и экспериментальной аппроксимации профилограмм образцов (1) показывает, что рассмотренная модель описывает только линейный участок поверхности образца. Модель травления разработана в предположении стационарных потоков активной компоненты без учета деталей процесса диффузии поперек конвективного слоя. Поэтому член, описывающий начальный участок поверхности, не отражен в формуле (9). (Детальное рассмотрение конвективно-диффузионных процессов растворения по всей поверхности будет представлено в следующих работах). Теоретическая кривая совпадает с линейным участком экспериментальной поверхности при значениях  $\frac{\Delta x}{\Delta y} = B_1 = \frac{D}{U_1 \delta_1} = 2,3 \cdot 10^{-3}$  (для  $U_1 = 5$  см/с) и

$B_2 = \frac{D}{U_2 \delta_2} = 0,8 \cdot 10^{-3}$  (для  $U_2 = 12$  см/с). Отношение  $\frac{B_1}{B_2}$  позволяет оценить величину  $\frac{\delta_1}{\delta_2}$ . Она

составляет 0,8 и ее отличие от единицы объясняется флотационным эффектом, величина которого, как и величина обусловленного им зазора  $\delta$ , растет с увеличением скорости движения. Оценка этого же отношения, по результатам электрических измерений для соответствующих скоростей движения полировальника, дает близкую величину  $\frac{\delta_1^*}{\delta_2^*} = 0,65$ .

В выражении (9) постоянная  $A$  является мерой приподнятости передней кромки образца ( $x = 0$ ) над поверхностью полировальника. Из эксперимента эта постоянная определяется с большой ошибкой, поэтому она не использовалась для определения параметров процесса.

В нашем случае, как указывалось ранее, растворителем является смесь воды со спиртом в соотношении 3:7; активной компонентой в этой смеси является вода. Коэффициент диффузии оценивали по величинам  $B_1^*$  или  $B_2^*$ , взяв соответствующее значение  $\delta^*$ . Расчет дает реальное значение этого коэффициента диффузии  $(0,9 \div 1,0) \cdot 10^{-5}$  см<sup>2</sup>/с, согласно [9] коэффициент диффузии воды в спирте  $\sim 1,0 \cdot 10^{-5}$  см<sup>2</sup>/с.

При полировании в стационарных условиях образованная поверхность, за исключением кромок, плоская и имеет наклон в сторону движения (рис. 2). Величина наклона  $B$  определяет отклонение поверхности образца от плоскопараллельности и в нашем случае составляет порядка 20 мкм/см для скорости движения 5 см/с и  $\sim 8$  мкм/см для  $U = 12$  см/с. Обнаружен технологически важный факт, что вне зависимости от исходной геометрии поверхности, при полировании образцов в указанных условиях, формируется плоскость, распространяющаяся практически на весь образец.

Разработка технологических условий формирования поверхностей с заданными геометрическими параметрами не является непосредственной целью этой работы. Однако отметим, что, как видно из формулы профиля поверхности (9), изменением коэффициента диффузии, скорости движения полировальника, величины зазора, зависящей от вязкости раствора и скорости движения полировальника, можно регулировать отклонение поверхностей образца от плоскопараллельности.

Из уравнения (9), описывающего стационарный профиль поверхности образца, следует также, что в него не вошли величины, характеризующие свойства вещества образца. Более того, профиль

образованной поверхности не зависит от константы химической реакции и концентрации реагента; форма поверхности зависит только от параметров  $D, U, \delta$ .

Таким образом, мы сталкиваемся с удивительным, на первый взгляд, фактом: в условиях выбранной методики полирования (нет взаимодействия частиц реагента между собой, свободный доступ к реакционной поверхности, свободный отвод продуктов реакции от поверхности, первый порядок реакции химического взаимодействия реагента и материала образца) профиль поверхности образца оказывается одинаковым для любого обрабатываемого вещества. Этот факт является следствием стационарности процесса полирования, которая в нашем случае достигается благодаря непрерывному поддержанию постоянства зазора  $2\delta$  между образцом и полировальником (в последующей работе будет показано, что от свойств травящего раствора и вещества образца существенно зависит скорость полирования).

#### **Выводы**

1. Сравнение полученных экспериментальных и теоретических зависимостей показало, что есть качественное согласие хода теоретической зависимости с линейным участком экспериментальной кривой. Их количественное совпадение имеет место при реальных значениях коэффициента диффузии  $D$  и величины зазора  $2\delta$  без использования подгоночных параметров. Это свидетельствует о правильности модели и позволяет прогнозировать величину отклонения от плоскопараллельности подбором скорости вращения полировальника, вязкости растворителя, влияющей на величину зазора и т.д.

2. Стационарная форма поверхности зависит только от коэффициента диффузии активной компоненты, скорости движения, величины зазора. Это означает, что независимо от концентрации травителя и скорости химической реакции, в указанных условиях обработки разных материалов следует ожидать образования одинаковой формы поверхности.

3. С увеличением скорости движения полировальника и величины зазора уменьшается наклон линейного участка поверхности образца, то есть уменьшается отклонение обработанной поверхности от плоскопараллельности.

#### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Левич В.Г. Физико-химическая гидродинамика. М., 1959.
2. Rogers C., Raer L., Filipossian A. Analysis of flow between a wafer and pad during CMP processes // J. of Electronic Materials. 1998. V. 27. №10. P. 1082–1087.
3. Zabasajia J., Merchant T., Belinda Ng, Green D. Modeling and characterization of Tungsten chemical and mechanical polishing processes // J. Electrochem. Soc. 2001. V. 148. № 2. P. 673–677.
4. Steigerwald J.M., Murarka S.P., Gutman R.J. Chemical mechanical planarization of microelectronic materials. Part 1. New York, Wiley and Sons., 1997.
5. Перевозчиков В.А., Скупов В.Д. Особенности абразивной и химической обработки поверхности полупроводников. Нижний Новгород, 1992.
6. Карбань В.И., Rogov В.В., Хофман Х. и др. Обработка полупроводниковых материалов. Киев, 1982.
7. Карбань В.И., Борзаков Ю.И. Обработка монокристаллов в микроэлектронике. М., 1988.
8. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. М., 1974.
9. Краткий справочник физико-химических величин /Под ред. А.А. Равделя, А.М. Пономаревой. Л., 1983.

*Поступила 24.04.2002*

#### **Summary**

A technological experiment is proposed to establish physical and chemical processes providing chemical hydrodynamic non-contact polishing crystal surface. To describe the processes a balance equation of diffusion, convective and active components of etching fluxes is used. An analytical expression of a relationship between a shape of the surface of the treated material and physical parameters of the processes is obtained. It was established that a macrorelief of the treated surface depends only on a speed of relative moving of the pad and a treated specimen, a distance between the pad and the specimen and a diffusion coefficient of active component in etching solution. Therefore, the shape of the treated surface does not depend on the treated material concentration of active components and a constant of chemical reaction. A good agreement the calculated processes and experimental ones was achieved.