

УДК: 531.44, 621.891

**Р.В. Гольдштейн, М.Н. Осипенко**

Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва, Россия

## **ХИМИКО-МЕХАНИЧЕСКОЕ ПОЛИРОВАНИЕ. ЧАСТЬ II. МОДЕЛЬ ЛОКАЛЬНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ**

На основе проведенного ранее аналитического обзора современного состояния теории процесса предложены подходы к задаче моделирования химико-механического полирования (ХМП) с учетом комплекса явлений различного масштаба, определяющих в совокупности скорость процесса полирования, таких как диффузия активной рабочей жидкости в поверхностный слой, ограничение экспозиции химической обработки механически нагруженным полировальным. Построена модель процесса ХМП, в рамках которой получена зависимость скорости полирования от приложенной нагрузки, обобщающая эмпирический закон Престона.

**Ключевые слова:** химико-механическое полирование, абразив, жидкость, планаризация, модель.

**R.V. Goldstein, M.N. Osipenko**

Institute for Problem in Mechanics RAS, Moscow, Russia

## **CHEMICAL-MECHANICAL POLISHING. PART II. MODEL OF LOCAL INTERACTIONS**

On the base of the analytical review of the current state of the theory and problems of Chemical – mechanical polishing (CMP) modeling some approaches were suggested to the problem accounting for the complex of the phenomena of different scales determining the polishing rate such as diffusion of slurry into the surface layer and restriction of time of chemical treatment of the surface by a rough pad being under the action of a mechanical load. A model of the CMP process was developed. Within the framework of this model a dependence of the polishing rate on the loading parameters was derived. The dependence generalizes the empirical Preston law.

**Keywords:** chemical-mechanical polishing, abrasive, liquid, planarization, model.

### **Введение**

Химико-механическое полирование (ХМП) – широко распространенная технология в производстве элементов приборов и устройств микро- и нанoeлектроники. В работе на основе обзора современного состояния проблемы [1] представлены некоторые новые подходы к построению модели процессов полирования, частично отраженные в [2]. В модели учтено влияние комплекса явлений различного масштаба,

определяющих в совокупности скорость процесса полирования, таких как диффузия активной рабочей жидкости в поверхностный слой, ограничение экспозиции химической обработки шероховатостью полировальника. Это привело к обобщению закона полирования и позволило выявить основные параметры, влияющие на его скорость.

## 1. Моделирование процесса химико-механического полирования

Для интерпретации результатов химико-механического полирования (ХМП) скорость удаления материала  $dh/dt$  обычно оценивают из уравнения (уравнение Престона [3])

$$\frac{dh}{dt} = K \frac{N}{A} \frac{ds}{dt} \quad (1)$$

где  $h$  – толщина обрабатываемой пластины,  $N$  – сила прижатия полировальника к обрабатываемой пластине,  $A$  – площадь рабочей поверхности полировальника,  $N/A = p$  – нормальное давление на обрабатываемую поверхность,  $ds/dt$  – скорость относительного движения инструмента и детали,  $K$  – постоянная Престона. В случае упругого контакта между локальным индентором (частицей абразива) и плоской обрабатываемой поверхностью (задача Герца) постоянная  $K = (2E)^{-1}$  [4].

Модель Престона, в сущности, относится к абразивному износу обрабатываемой поверхности и не учитывает в явном виде присутствие жидкости и другие особенности технологии ХМП.

Реальные процессы полирования с высокой чистотой поверхности демонстрируют взаимосвязь с другими характеристиками системы, жесткостью полировальника, размером частиц абразива и др. Этим вопросам посвящены многочисленные работы, обзор которых можно найти в [1, 4, 5–7]. Покажем влияние на скорость полирования некоторой совокупности параметров физической и механической природы, что позволяет расширить диапазон модельных представлений технологии ХМП.

## 2. Механические аспекты взаимодействия

Полирование в обстановке химического воздействия происходит путем удаления с поверхности детали тонкого слоя вещества, имеющего меньшую прочность, чем неповрежденный слой. Таким веществом могут быть продукты реакции или исходный материал, испытавший диффузионное воздействие компонентов рабочей жидкости. Процесс

удаления свяжем с локальным контактом абразива и обрабатываемой поверхности. Относительное количество абразивных частиц, находящихся в силовом контакте с деталью, оценивается как

$$n^* \sim b(n^{2/3}), \quad (2)$$

где  $n$  – плотность абразивных частиц в рабочей жидкости,  $b \ll 1$  – коэффициент.

Если размер индивидуального пятна контакта частицы абразива с поверхностью детали соответствует модели упругого контакта (модель Герца [8])

$$a^* = 2 \left( \frac{3p_i r}{4E^*} \right)^{1/3}, \quad (3)$$

где  $p_i$  – усилие, приходящееся на одну частицу,  $r$  – радиус эффективной сферической абразивной частицы,  $E^*$  – эквивалентный модуль упругости, определяемый соотношением

$$\frac{1}{E^*} = \frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2}, \quad (4)$$

где, в свою очередь,  $E_1, \nu_1$  и  $E_2, \nu_2$  – модули упругости и коэффициенты Пуассона детали и абразивной частицы соответственно, то величина относительной площади контакта, приходящейся на одну активную частицу,

$$\left( \frac{S_i}{S} \right) \sim n^* \left( \frac{a^*}{r} \right)^2, \quad (5)$$

где  $S$  – площадь обрабатываемой поверхности,  $S_i$  – средняя площадь единичного контакта.

Расстояние до следующей области локального контакта и интервал времени до контакта на той же площадке оцениваются соответственно соотношениями

$$L \sim \left( \frac{S}{S_i} \right) 2a^*, \quad \tau^* \sim \frac{L}{v}, \quad (6)$$

где  $v = ds/dt$  – скорость относительного движения инструмента и детали.

Размер  $a^*$  зависит от плотности абразивных частиц через удельную нагрузку на одну активную частицу. Оценим эту нагрузку, используя (3):

$$p_i \sim \frac{Nr^2}{R^2 n^*} = \frac{\pi \sigma r^2}{bn^{2/3}}, \quad \sigma \approx \frac{N}{\pi R^2}, \quad (7)$$

где  $N$  – усилие прижатия полировальника и детали,  $\sigma$  – среднее давление на полировальник,  $R$  – радиус области прижатия.

Отсюда с точностью до постоянной порядка единицы

$$a^* = 2 \left( \frac{3p_i r}{4E^*} \right)^{1/3} \sim mr \left( \frac{\sigma}{E^* bn^{2/3}} \right)^{1/3}; \quad m \sim 2,7. \quad (8)$$

Соответственно,

$$\tau^* \sim \frac{L}{v} \sim \frac{rE^{*1/3}}{n^{4/9} \sigma^{1/3} v}. \quad (9)$$

Из (9) следует, в частности, характер изменения скорости полирования при вариации концентрации частиц абразива: при ее возрастании уменьшается интервал времени до повторного воздействия абразива на один и тот же участок.

### 3. Эффект химического воздействия

Оценим в обобщенном виде эффект химического воздействия. Будем считать в асимптотическом приближении, что характерные времена реакций, приводящих к необходимому ослаблению прочности поверхностных слоев, малы, так что эффект снижения прочности целиком определяется процессом диффузии активного компонента рабочей жидкости в обрабатываемый материал.

Будем представлять движение этого компонента рабочей жидкости в обрабатываемый материал в форме линейной диффузии при относительно малой концентрации диффундирующего вещества в растворе. В этом случае можно считать, что коэффициент диффузии  $D$  не зависит от концентрации вещества  $c$ . Процесс подчиняется закону Фика

$$\frac{\partial c}{\partial \tau} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2}. \quad (10)$$

Диффузия происходит с поверхности ( $x = 0$ ) в обрабатываемый материал (например, для участия в гетерогенной химической реакции). Вне приповерхностного слоя сохраняется исходная концентрация  $c_0$ . Решение уравнения (10) при  $\tau > 0$  имеет вид

$$\sigma(x, \tau) = c_0 \left[ x \left( 2\sqrt{D\tau} \right) \right]. \quad (11)$$

Градиент концентрации на расстоянии  $x$  от границы

$$\frac{\partial c}{\partial x}(x, \tau) = \frac{c_0}{\sqrt{\pi D \tau}} e^{-\frac{x^2}{4D\tau}}. \quad (12)$$

На границе обрабатываемой поверхности

$$\frac{\partial c}{\partial x}(0, \tau) = \frac{c_0}{\sqrt{\pi D \tau}}. \quad (13)$$

Это соотношение может быть использовано, если толщина диффузионного слоя  $\delta_D$ , где заметны вариации концентрации, существенно меньше толщины слоя активной жидкости. Величина  $\delta_D$  оценивается следующим образом:

$$\delta_D = \sqrt{\pi D \tau}. \quad (14)$$

Примем простое допущение, что поток активного вещества через поверхность раздела (обрабатываемую поверхность) пропорционален градиенту концентрации на этой поверхности. В свою очередь, будем считать, что скорость роста толщины обработанного слоя  $\partial h / \partial \tau$ , по крайней мере, для толщин, близких к мономолекулярным, пропорциональна величине потока активного вещества. Поэтому, используя (13), можно записать:

$$\frac{\partial h}{\partial \tau} \sim \frac{\partial c}{\partial x}(0, \tau) = \frac{c_0}{\sqrt{\pi D \tau}}. \quad (15)$$

Максимально возможная скорость полирования в процессе ХМП очевидно привязана к скорости химической обработки поверхности. Считая процесс квазистационарным, максимальную скорость полирования примем близкой к скорости нарастания обработанного слоя:

$$V_r \approx \frac{\partial h}{\partial \tau} \sim \frac{c_0}{\sqrt{\pi D \tau}}. \quad (16)$$

Здесь в качестве характерного времени  $\tau = \tau^*$  выступает средний интервал времени между двумя эпизодами контакта частиц абразива с обрабатываемой поверхностью на одной и той же площадке.

Окончательно из (9) и (16) получим с точностью до постоянной

$$V_r \sim \frac{c_0 n^{2/9} v^{1/2}}{(Dr)^{1/2}} \left( \frac{\sigma}{E^*} \right)^{1/6}. \quad (17)$$

Полученное соотношение значительно отличается от уравнения Престона (1). Оно дает возможность иначе оценить вклад конкретных механизмов взаимодействия в рассматриваемой системе.

#### 4. Взаимосвязь скорости полирования и давления

Рассмотрим влияние одного параметра – давления со стороны полировальника – на скорость полирования в рамках описанной схематической модели полирования в двух аспектах связи с локальной геометрией в области непосредственного контакта между действующими объектами.

1. При использовании мягкого шероховатого полировальника процессы активного взаимодействия между абразивом и полируемой пластиной сосредоточены в основном на выступах отдельных шероховатостей (рис. 1). Доступ химических реагентов к обрабатываемой поверхности не затруднен. Такая ситуация отражена, например, в [4, 9]. Она напоминает задачи трения шероховатых поверхностей [10].

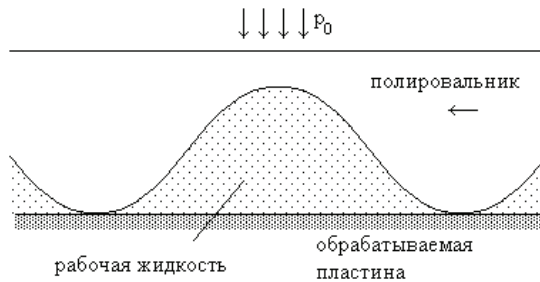


Рис. 1. Схема взаимодействия элементов в процессе ХМП

2. При значительном сдавливании частиц абразива между обрабатываемой пластиной и относительно мягким полировальником в области локального контакта затрудняется движение рабочей жидкости в

области полирования, что может снизить интенсивность химического воздействия.

Представляется, что первая ситуация наиболее характерна при относительно низких усилиях прижатия в области полирования, а вторая – при высоких уровнях контактного давления, когда перекрываются каналы перетекания рабочей жидкости. Таким образом, в задаче происходит разделение масштабов взаимодействия. Рассмотрим упомянутые эффекты поочередно.

Простейшее предположение о пропорциональной взаимосвязи скорости полирования и площади контакта выступа полировальника и обрабатываемой пластины дает форму записи закона изнашивания поверхности в виде (аналогичные соотношения для износа трущихся поверхностей известны и в трибологии [10])

$$V_R \sim p_0^{2/3}, \quad (18)$$

где  $V_r = \frac{dh}{dt}$  – скорость удаления материала,  $p_0$  – давление со стороны полировальника.

Заметим, что обработка экспериментальных данных полирования окиси кремния по формуле такого вида (например, в [9]) дает значимое отклонение в области малых давлений (до  $\sim 30$  кПа). Ситуация меняется, если предположить, что в областях локального контакта на выпуклостях полировальника процесс абразивного уноса массы происходит, как в описанной выше модели однородного контакта детали и полировальника (17). Фактически при этом принимается предположение, что, поскольку интенсивность химической обработки поверхности резко падает с глубиной, интенсивный химико-механический износ обрабатываемой поверхности происходит только на выступах полировальника. Промежутки между выступами служат для транспортировки рабочей жидкости.

Формулу (17) можно представить в виде

$$V_r \sim C \sigma^{1/6} v^{1/2} \frac{S}{S_0}, \quad (19)$$

где  $C$  – постоянная, не зависящая от давления и скорости движения,  $\sigma$  – среднее давление на площадке контакта,  $S/S_0$  – отношение площади контакта единичной шероховатости полировальника к площади,

занимаемой шероховатостью в целом. Обрабатываемую пластину будем считать жесткой, а шероховатость округлой с характерным радиусом кривизны при вершине  $R_1$  и радиусом проекции основания на плоскость полировальника  $R_0 > R_1$ .

Для такой системы из условий упругого контакта можно записать

$$S \sim \pi \left( \frac{3F_1 R_1}{4E_{ef}} \right)^{2/3}; \quad F_1 \approx \pi \sigma R_0^2; \quad S_0 \approx \pi R_0^2; \quad \frac{S}{S_0} \sim \left( \frac{3\pi \sigma R_1}{4E_{ef} R_0} \right)^{2/3}, \quad (20)$$

где  $S$  – площадь единичного контакта,  $S_0$  – площадь основания округлой шероховатости,  $F_1$  – усилие вдавливания, приходящееся на одну шероховатость. Соответственно,

$$p \sim \sigma \left( \frac{S_0}{S} \right) \sim \sigma^{1/3} \left( \frac{4E_{ef} R_0}{3\pi R_1} \right)^{2/3}. \quad (21)$$

Отсюда следует оценка влияния сферической формы единичной шероховатости на скорость полирования:

$$V_R \sim C \sigma^{13/18} v^{1/2} \left( \frac{3\pi R_1}{4E_{ef} R_0} \right)^{5/9}. \quad (22)$$

Наибольшая скорость соответствует максимальному сближению радиусов  $R_1$  и  $R_0$ .

Сравнивая показатели степени давления в (22) и (18), а также с упоминаемой в литературе, например в [4], величиной 5/6, можно заметить, что полученное значение – 13/18 – занимает промежуточное положение между ними, причем все три показателя близки.

При высоких давлениях происходит смыкание контакта относительно мягкого полировальника и детали и перекрытие потоков рабочей жидкости (рис. 2) Это мешает транспортировке химически активных компонентов в область контакта, что снижает скорость реакции и в конечном счете уноса массы. В технологии ХМП экспериментальный факт снижения скорости полирования при высоких значениях давления со стороны полировальника известен (см. например, данные в [11]). Примем следующую механическую модель явления.

Просвет между полировальником и деталью контролируется приложенным внешним давлением и распором со стороны абразивных частиц. По мере увеличения давления из-за прогибания поверхности



полировальника уменьшается величина зазора, заполненного рабочей жидкостью. Наконец, при некотором уровне давления происходит смыкание поверхностей полировальника и детали, что практически прекращает перетекание рабочей жидкости и ослабляет тем самым ее химическую активность (см. рис. 2). Проведем сравнительные оценки выделенных вариантов.

В первом случае (см. рис. 2, *a*) будем считать, что давление недостаточно для смыкания поверхностей, но по мере роста давления увеличивается площадь контакта абразивной частицы с обрабатываемой поверхностью. В соответствии с моделью упругого контакта [8] отношение площади области контакта к площади, приходящейся на один контакт, аналогично (20), имеет вид

$$\frac{S_r}{S_{r0}} \sim \left( \frac{3\pi\sigma r}{4E_{ef}L} \right)^{2/3}, \quad (23)$$

где  $r$  – радиус абразивной частицы,  $L$  – среднее полурасстояние между соседними частицами на контакте,  $E_{ef}$  – модуль упругости поверхности полировальника.

Области, доступные для химической обработки, составляют долю порядка  $(1 - S_r/S_{r0})$  от обрабатываемой площади. Тогда, если химическая обработка является необходимой преамбулой абразивного уноса массы, скорость полирования (3) должна быть пропорциональна площади, доступной для химического воздействия. Учитывая связь между распределением частиц в рабочем зазоре и их концентрацией  $n$  в виде

$$r/L \sim n^{*1/3},$$

получим

$$V_R \sim C\sigma^{1/6}v^{1/2} \left( 1 - \frac{3\pi\sigma n^{*1/3}}{4E_{ef}} \right)^{2/3}. \quad (24)$$

Соотношение (24) дает немонотонную взаимосвязь между скоростью полирования и давлением со стороны полировальника. Максимум скорости полирования ожидается в области давлений

$$\sigma^* \sim m_1 \frac{E_{ef}}{n^{*1/3}}; \quad m_1 = 4/15\pi. \quad (25)$$

В большинстве вариантов технологии отношение  $\sigma n^{*1/3} / E_{ef} m \ll 1$  (см., например, [4]), поэтому практически наблюдается только восходящая ветвь (24).

Оценим асимптотику процесса во втором варианте задачи. Представим, как и выше, в модельном приближении область контакта в виде области однородного давления на границе контактирующих полуплоскостей, расклиниваемых абразивными частицами (см. рис. 2).

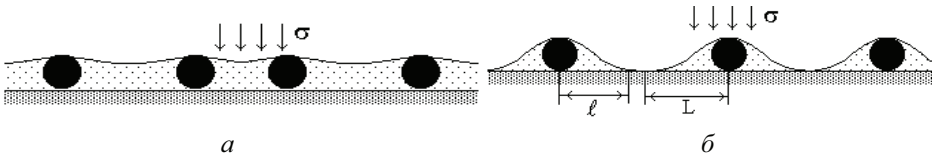


Рис. 2. Ситуация в области вершины одиночной шероховатости: *a* – малое усилие прижатия, *б* – локальное смыкание поверхности полировальника и детали

В зависимости от величины давления размер локального нарушения контакта, вызванного присутствием частиц абразива, меняется. Будем считать, что частицы расположены достаточно редко, так что взаимодействия между ними нет. Область нарушения контакта можно уподобить эффективной трещине нормального разрыва, в концевых частях которой при смыкании контактирующих полуплоскостей выполняется условие плавного смыкания. Присутствие касательных сил, вызванное разницей деформационных характеристик контактирующих материалов, в данном случае для оценки нормальных смещений несущественно. Размер отслоения  $2\ell$  как соответствующий предельному равновесию трещины нормального разрыва при обозначенном условии найдем, учитывая, что эффективная трещина находится под действием однородного сжатия давлением  $\sigma$  и расклинивающих сил со стороны жесткой абразивной частицы с характерным радиусом  $R$  (рис. 3).

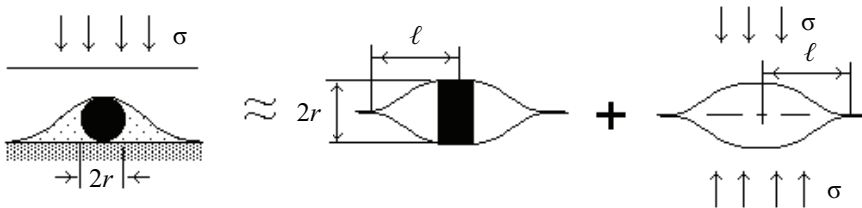


Рис. 3. Схема модельной задачи о смыкании контакта между полировальником и деталью

Для такой расчетной схемы в плоской задаче условие плавного смыкания в концевых областях эффективной трещины запишем в виде

$$K_1(\sigma) + K_1(r) \equiv 0, \quad (26)$$

где  $K_1(\sigma) \approx \sigma\sqrt{\pi\ell}$  – коэффициент интенсивности напряжений от действия однородного сжатия со стороны полировальника,

$K_1(R) \approx \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{E_{ef}r}{\sqrt{\ell}}$  – коэффициент интенсивности напряжений от действия жесткого клина толщиной  $2R$  (плоское напряженное состояние) [11].

Из (26) получим искомый размер:

$$\ell \approx \frac{\sqrt{2}}{\pi} \frac{E_{ef}r}{\sigma}; \quad \ell < L. \quad (27)$$

Размер области нарушения контакта, т.е. в данной модели области, доступной для химической обработки поверхности, уменьшается по мере возрастания напряжений внешнего сжатия.

Заметим, что величина  $\sigma$  связана с давлением со стороны полировальника опосредованно из-за присутствия в рабочем пространстве жидкости. Можно выделить три характерных асимптотических ситуации.

Если вытекание рабочей жидкости затруднено, контакт между твердыми телами полировальника и полируемой пластины находится под давлением, представляющим разницу между давлением прижатия полировальника  $p_0$  и давлением рабочей жидкости в рабочем пространстве  $p_g$ :

$$\sigma \approx p_0 - p_g. \quad (28)$$

Если полировальник плотно контактирует с пластиной при свободном движении жидкости, то  $\sigma \sim p_0$ .

Если жидкость свободно вытекает, а усилие прижатия передается через упругий [12] контакт отдельных частиц и полировальника, ситуация близка к (17). Увеличение давления вызывает рост скорости полирования.

Рассмотрим вариант полирования в условиях перекрытия зазора. Для этого диапазона давлений оценка взаимосвязи скорости полирования и внешнего давления может быть сделана в рамках предположения о пропорциональности скорости полирования и отношения размера локальных областей нарушения контакта ко всей площади контакта, т.е.

$$V_r \sim \frac{\ell}{L}. \quad (29)$$

Свяжем, как и ранее, расстояние между частицами абразива  $L$  и концентрацию частиц в плоском слое  $n^*$ :

$$L/r \sim n^{*-1/3}. \quad (30)$$

Тогда для варианта плотного контакта полировальника с пластиной при свободном движении жидкости ( $\sigma \sim p_0$ ) имеем с учетом (17), (27), (29), (30)

$$V_r \sim C \frac{n^{5/9} v^{1/2} \left( \frac{E_{ef}}{\sigma} \right)^{5/6}}{(Dr)^{1/2}}. \quad (31)$$

Скорость полирования снижается с ростом давления.

Описанные варианты взаимодействия воспроизводят условия для различных механизмов взаимосвязи скорости полирования и давления со стороны полировальника. Поэтому можно говорить о диаграмме условий реализации этих механизмов. Границами существования этих механизмов на диаграмме будут условия изменения сценария рабочего процесса. Так, механизм перекрытия зазора между частицами реализуется только при давлениях, превышающих необходимое для соприкосновения поверхности полировальника и пластины. Давление, соответствующее границе перехода между описанными механизмами полирования, может быть найдено из условия смыкания поверхности полировальника и обрабатываемой (жесткой) пластины, полагая для этого  $\frac{\ell}{L} = 1$ . Из (27), (28) и (30) находим

$$p^* \sim \frac{\sqrt{2}}{\pi} E_{ef} n^{*2/3}. \quad (32)$$

Таким образом, для различных сценариев силового взаимодействия в системе полировальник–абразив–деталь характерны различные виды взаимосвязи между скоростью полирования и давлением, создаваемым прижатием полировальника к обрабатываемой детали.

Работа выполнена при поддержке Программы фундаментальных исследований Президиума РАН № 13.

## Библиографический список

1. Химико-механическое полирование. Ч. 1. Основные закономерности: обзор. (см. статью в настоящем издании).
2. Гольдштейн Р.В., Осипенко Н.М. Химико-механическое полирование. Модели процесса. – М.: ИПМех РАН. – Препринт № 918. – 2009. – 40 с.
3. Chemical-mechanical polishing: Process manufacturability / R. Jairath [et al.] // Solid State Technology. – 1994. – No. 7. – P. 71–75.
4. Luo J., Dornfeld D.A. Material removal mechanism in chemical mechanical polishing: theory and modelling // IEEE transactions on semiconductor manufacturing. – 2001. – Vol. 14, No. 2. – P. 112–133.
5. Nanz G., Camilletti L.E. Modeling of chemical-mechanical polishing: a review // IEEE transactions on semiconductor manufacturing. – 1995. – Vol. 8, No. 4. – P. 382–388.
6. Steigerwald J.M., Murarka S.P., Gutman R.J. Chemical-mechanical planarization of microelectronic materials. – N.Y.: John Wiley & sons, INC, 1997. – 324 p.
7. Zantye P.B., Kumar A., Sikder A.K. Chemical mechanical planarisation for microelectronics applications // Material Sci. and Engineering. – 2004. – R. 45. – P. 89–220.
8. Джонсон К. Механика контактного взаимодействия. – М.: Мир, 1989. – 510 с.
9. Shi F.G., Zhao B. Modeling of chemical-mechanical polishing with soft pads // Applied Physics. – 1998. – A. 67. – P. 249–252.
10. Мур Д. Основы и применения трибоники. – М.: Мир, 1978. – 487 с.
11. Bhushan M., Rouse R., Lukens J.E. Chemical-mechanical polishing in semidirect contact mode // J. Electrochemical Society. – 1995. – Vol. 142, No. 11. – P. 3845–3851.
12. Черепанов Г.П. Механика хрупкого разрушения. – М.: Наука, 1974. – 640 с.

## References

1. Chemical-mechanical polishing. Part 1. The basic pattern; review.
2. Goldstein R.V., Osipenko N.M., Chemical-mechanical polishing. Process model. [*Himiko-mehanicheskoe polirovanie*]. Moscow: IPMeh Sciences. – Preprint № 918. 2009. – 40 p.

3. Jairath R. Chemical-mechanical polishing: Process manufacturability. *Solid State Technology*, 1994. – No. 7. – P. 71–75.

4. Luo J., Dornfeld D.A. Material removal mechanism in chemical mechanical polishing: theory and modelling. *IEEE transactions on semiconductor manufacturing*, Vol. 14. – No. 2. – 2001. – P. 112–133.

5. Nanz G., Camilletti L.E. Modeling of chemical-mechanical polishing: a review. *IEEE transactions on semiconductor manufacturing*, Vol. 8. – No. 4. – 1995. – P. 382–388.

6. Steigerwald J.M., Murarka S.P., Gutman R.J. Chemical-mechanical planarization of microelectronic materials. *N.Y.: John Wiley & sons, INC*, 1997. – 324 p.

7. Zantye P.B., Kumar A., Sikder A.K. Chemical mechanical planarization for microelectronics applications. *Material Sci. and Engineering*, 2004. – R. 45. – P. 89–220.

8. K. Johnson, Mechanics of contact interactions [*Mehanika kontaktnoga vzaimodejstvija*]. Mir, 1989. – 510 s.

9. Shi F.G., Zhao B. Modeling of chemical-mechanical polishing with soft pads. *Applied Physics*, A. 67. – 1998. – P. 249–252.

10. Moore, D. Fundamentals and applications triboniki [*Osnovy i primeneniya triboniki*]. Springer-Verlag, 1978. – 487 p.

11. Bhushan M., Rouse R., Lukens J.E. Chemical-mechanical polishing in semidirect contact mode. *J. Electrochemical Society*, Vol. 142, No. 11. – 1995. – P. 3845–3851

12. Cherepanov G.P. The mechanics of brittle fracture [*Mehanika hrupkogo razrusheniya*]. Moscow: Nauka, 1974. – 640 p.

### Об авторах

**Гольдштейн Роберт Вениаминович** (Москва, Россия) – член-корреспондент РАН, доктор физико-математических наук, профессор, зав. лабораторией Института проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН (Москва, пр. Вернадского, 101-1, e-mail: goldst@ipmnet.ru, тел. (495) 434-35-27).

**Осипенко Николай Михайлович** (Москва, Россия) – кандидат технических наук, старший научный сотрудник Института проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН (Москва, пр. Вернадского, 101-1, e-mail: osipnm@mail.ru, тел. (495) 434-43-14).

### **About the authors**

**Goldstein Robert Veniaminovich** (Moscow, Russia) – corresponding member of the RAS, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Head of Laboratory A.Y. Ishlinsky Institute for Problem in Mechanics RAS (Moscow, pr.Wernadskogo, 101-1, goldst@ipmnet.ru, (495) 434-35-27).

**Osipenko Nikolay Michailovich** (Moscow, Russia) – PhD in engng, Senior scientist, A.Y. Ishlinsky Institute for Problem in Mechanics RAS (Moscow, pr.Wernadskogo, 101-1, osipnm@mail.ru, (495) 434-43-14).

Получено 3.06.2011