

Некоторые особенности планаризации поверхности подложек изделий микро- и наносистемной техники

© В.В. Холевин

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

Рассмотрен процесс тотальной планаризации поверхности подложек изделий микро- и наносистемной техники методом химико-механического полирования. Отличие процесса планаризации подложек МЭМС/НЭМС-устройств состоит в том, что на одной обрабатываемой поверхности могут располагаться элементы с размерами, отличающимися на два (и более) порядка. В то же время для большинства обрабатываемых поверхностей характерны значительные перепады высоты исходного микрорельефа, кроме того, обрабатываемая поверхность может иметь участки из различных материалов, существенно отличающихся по физико-механическим и химическим свойствам, а подложки обладают повышенной склонностью к хрупкому разрушению. В процессе планаризации необходимо обеспечить эффективное сглаживание микрорельефа обрабатываемой поверхности при минимальной величине припуска на обработку. Проведено теоретическое исследование процесса химико-механического полирования. Рассмотрены факторы, влияющие на скорость локального изнашивания обрабатываемой поверхности. Предложена математическая модель для определения скорости изнашивания, учитывающая действие режимных факторов и условий обработки. Разработана математическая модель для оценки интегральной величины износа в произвольно выбранной точке поверхности подложки. Представлена методика расчета распределения величин износа по обрабатываемой поверхности, которая позволяет учитывать распределение (поля) скоростей абразивной среды, давления, температуры, химической активности среды, геометрию поверхности полировальника. Приведены результаты расчета распределения величин износа по обрабатываемой поверхности для некоторых режимов обработки. Результаты вычислительных экспериментов, проведенных с использованием разработанных математических моделей, позволяют сделать вывод о возможности эффективного управления процессом планаризации методом химико-механического полирования для повышения коэффициента планаризации.

Ключевые слова: микро- и наносистемная техника, подложка, химическая планаризация, химико-механическое полирование, абразивный износ.

Современный этап создания новых изделий микро- и наносистемной техники характеризуется постоянно возрастающими требованиями к операциям планаризации поверхности подложек и соответственно повышенным интересом к разработке новых методов и средств планаризации поверхности. Упрощенный вариант схемы технологического процесса тотальной планаризации многоуровневой металлизации пред-

ставлен на рис. 1. На подложку 1 (рис. 1, а) наносят слой диэлектрика 2 (рис. 1, б), на поверхности которого методом фотолитографии формируют защитную маску травления из фоторезиста 3 (рис. 1, в). После химического травления и удаления маски 3 (рис. 1, г) на поверхность подложки тотально наносится слой электрохимической меди 4 (рис. 1, д). Затем в результате тотальной планаризации получается планарная поверхность 5 (рис. 1, е). Следует отметить, что задача планаризации существенно усложняется неоднородностями исходного рельефа 4 (см. рис. 1, д) поверхности подложки [1–7].

В технологии изготовления МЭМС/НЭМС-устройств, так же как и в технологии микро- и нанoeлектроники, основным методом тотальной планаризации является химико-механическое полирование (ХМП), однако требования к процессам планаризации поверхности подложек изделий микро- и наносистемной техники и микро- и нанoeлектронных устройств существенно отличаются [3–5]. Планаризация методом ХМП используется, в частности, при методе поверхностной микрообработки для создания всевозможных механических устройств, датчиков давления, ВЧ МЭМС, МОЭМС и множества других систем. Без эффективных методов планаризации невозможно решение одной из основных задач, стоящих перед изготовителями изделий микро- и наносистемной техники, — интеграции миниатюрных электромеханических систем (МЭМС/НЭМС) с электронными (КМОП) схемами, обрабатывающими сигналы сенсорных устройств и формирующими сигналы управления.

Основное отличие процесса планаризации подложек МЭМС/НЭМС-устройств состоит в том, что на одной обрабатываемой поверхности могут располагаться элементы с размерами, отличающимися на два (и более) порядка. В то же время для большинства обрабатываемых поверхностей характерны значительные перепады высоты исходного микрорельефа, кроме того, обрабатываемая поверхность может иметь участки из различных материалов, существенно отличающихся по физико-механическим и химическим свойствам, а подложки обладают повышенной склонностью к хрупкому разрушению.

В целях обеспечения жестких требований к поверхности пластины (отклонение от плоскостности < 5 мкм, шероховатость < 10 Å) необходимо раз-

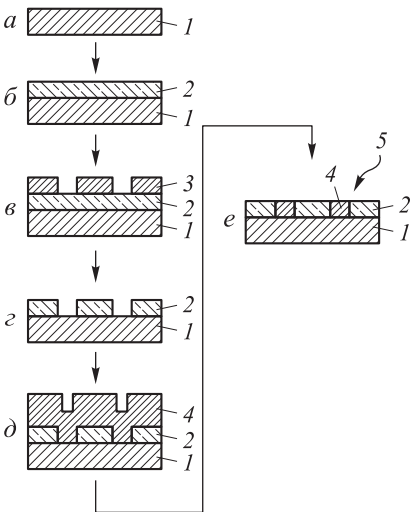


Рис. 1. Схема процесса химико-механической планаризации

работать методику расчета распределения величин износа по обрабатываемой поверхности пластины в процессе обработки методами ХМП.

Очевидно, что при полировании ожидаемая форма обрабатываемой поверхности будет полностью определена, если известна форма исходной поверхности и распределение величин линейного износа по обрабатываемой поверхности. Однако непосредственное определение величин линейного износа расчетным путем осложняется многообразием факторов, влияющих на скорость изнашивания обрабатываемой поверхности при механическом или химико-механическом полировании. При решении задачи формообразования целесообразно разбить факторы, влияющие на скорость изнашивания обрабатываемой поверхности, на две группы.

В первую группу включают постоянные факторы, значения которых одинаковы во всех точках обрабатываемой поверхности и предполагаются неизменными в течение всего времени обработки, например физико-механические свойства обрабатываемого материала и материала инструмента, род и зернистость абразивной составляющей суспензии, состав и химическая активность жидкой фазы абразивной суспензии и др.

Во вторую группу входят факторы, являющиеся функциями времени и координат (или только координат) произвольной точки a_i обрабатываемой поверхности, например величина скорости точки a_i относительно поверхности инструмента, величина давления, плотность абразивной и химически активной среды, температура и т. п.

Выражение для скорости изнашивания обрабатываемой поверхности может быть представлено в форме математической модели, получившей широкое распространение в теории резания [2]:

$$\frac{du}{dt} = k_0 A_1^{m_1} \cdot A_2^{m_2} \cdot \dots \cdot A_n^{m_n}, \quad (1)$$

где $\frac{du}{dt}$ — скорость абразивного изнашивания, мкм/с; k_0 — постоянный коэффициент, учитывающий действие постоянных факторов; A_1, A_2, \dots, A_n — факторы второй группы; m_1, m_2, \dots, m_n — показатели степеней.

Численные значения величины коэффициента k_0 и показателей степеней m_1, m_2, \dots, m_n могут быть в результате проведенного многофакторного эксперимента. После экспериментального определения этих значений величина износа в точке a_i за время обработки можно вычислить путем интегрирования выражения (1):

$$u_i = k_0 \int_0^T A_1^{m_1} \cdot A_2^{m_2} \cdot \dots \cdot A_n^{m_n} dt. \quad (2)$$

Расчет распределения величин линейного износа по обрабатываемой поверхности существенно облегчается, если известна или задана величина линейного износа хотя бы в одной точке обрабатываемой поверхности. Например, можно установить время обработки T таким образом, чтобы величина износа в некоторой избранной точке a_1 , например в центре подложки, имела определенное значение, равное припуску на обработку в этой точке. Тогда для расчета распределения величин линейного износа по обрабатываемой поверхности достаточно провести расчет соотношений величин u_i/u_1 .

Предлагаемая методика учитывает действие факторов первой и второй группы на распределение величин износа по обрабатываемой поверхности. Величина износа в любой произвольно выбранной точке a_i обрабатываемой поверхности может быть определена путем интегрирования по времени обработки выражения

$$\frac{du}{dt} = F(k_0, V, P_{(1)}, \rho, pH, T), \quad (3)$$

где $\frac{du}{dt}$ — скорость абразивного изнашивания, мкм/с; k_0 — постоянный коэффициент; V — величина скорости абразивной среды относительно изнашиваемой поверхности, м/с; $P_{(1)}$ — давление, Н/м²; ρ — плотность абразивной среды, кг/м³; T — температура обработки; pH — водородный показатель.

Формула (3) для каждой конкретной схемы и условий обработки приводится к частному виду с учетом распределения величин V , P , ρ , pH, T в зоне контакта обрабатываемой поверхности и инструмента.

Следует отметить, что процессы доводки и полирования имеют статистическую природу, характеризуюсь массовым динамическим воздействием абразивных зерен на обрабатываемую поверхность, поэтому под символами V , $P_{(1)}$, ρ , pH, T подразумеваются средние значения величин в окрестности точки a_i .

При изменении во времени величин $P_{(1)}$, ρ , V и постоянных pH, T величина износа за время t может быть выражена как

$$u = k_0 \int_0^t [P_{(1)}(t)]^y \rho(t) V(t) dt. \quad (4)$$

Для определения функций $P_{(1)}(t)$, $\rho(t)$, $V(t)$ при заданном законе движения точки a_i , описываемом в полярной системе координат уравнении

ями $R = R(t)$, $\alpha = \alpha(t)$, необходимо определять распределение величин $P_{(1)}$, ρ , V в системе координат R, α (т. е. поля этих величин).

Поле скоростей абразивной среды в неподвижной системе координат R, α описывается следующими уравнениями:

$$\begin{aligned} V_{aR} &= -k\omega_2 R_0 \sin(\alpha), \\ V_{a\alpha} &= [\omega_1 + k(\omega_2 - \omega_1)] - k\omega_2 R_0 \cos(\alpha), \end{aligned} \quad (5)$$

где V_{aR} и $V_{a\alpha}$ — проекции скорости абразивной среды на направления R, α ; k — коэффициент, описывающий передачу импульса абразивным зернам со стороны звеньев 1 и 2.

При абразивной доводке величину коэффициента k приближенно можно выразить через твердости (по Бринеллю) поверхностей звеньев 1 и 2:

$$k = \frac{HB_1}{HB_2 + HB_1}. \quad (6)$$

При полировании на мягких полировальниках основная масса абразивных зерен удерживается поверхностью полировальника, поэтому коэффициент k можно принять равным единице, если инструментом является звено 2, или нулю, если инструментом является звено 1.

Распределение плотностей абразивной среды в зоне контакта деталь — инструмент связано с полем скоростей абразивной среды уравнением неразрывности:

$$\frac{dp}{dt} + \text{div } \rho \bar{V}_a = 0, \quad (7)$$

которое преобразуется для случая обработки по схеме, представленной на рис. 2, к виду

$$(2bR + a \cos \alpha) \frac{d\rho}{dt} + aR \sin \alpha \frac{d\rho}{dR} = 0, \quad (8)$$

где $a = -k\omega_0 R_0$; $b = \frac{\omega_1 + k(\omega_2 - \omega_1)}{2}$.

Общее решение уравнения (8) имеет вид

$$\rho = F(bR^2 + aR \cos \alpha), \quad (9)$$

где F — произвольная дифференцируемая функция.

Для определения функции F необходимо узнать распределение плотностей абразивной среды вдоль границы зоны контакта деталь — инструмент (линия Γ на рис. 3), т. е. граничные условия.

В работе были проведены расчеты распределения величин износа по обрабатываемой поверхности для некоторых частных случаев. При расчете было использовано допущение о симметрии поля давления абразивной среды относительно центра условной детали (точка O_1 на рис. 3). Моделирование поля распределения плотности абразивной среды проводилось для граничных условий, заданных по линейному закону:

$$\rho_1(R) = \frac{\rho_0}{L_1}(L_2 - R), \quad (10)$$

где L_1, L_2 — постоянные положительные параметры, имеющие размерность длины.

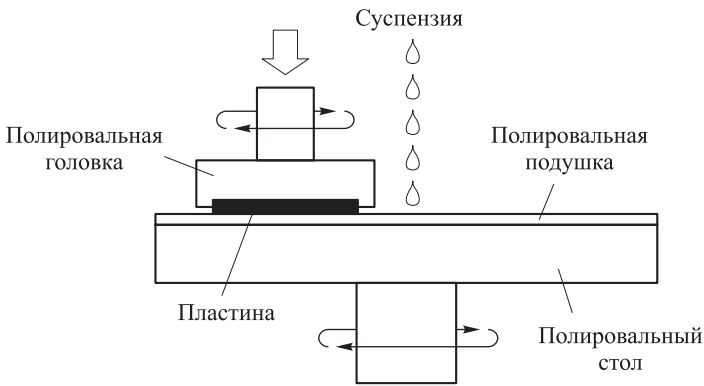


Рис. 2. Схема установки для ХМП

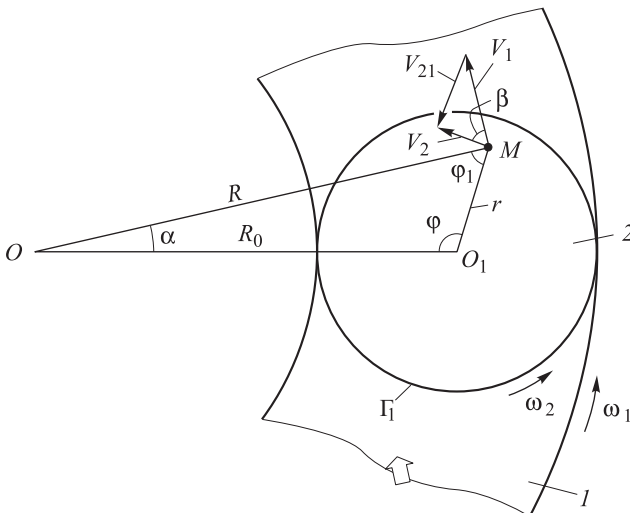


Рис. 3. Схема расчета распределения величин износа

При постоянных угловых скоростях $\bar{\omega}_1$ и $\bar{\omega}_2$ вращения звеньев 1, 2 и непрерывной подаче абразивной суспензии поля величин \bar{V}_a и ρ стационарны, следовательно, можно предположить, что поле величин $P_{(1)}$ при полировании также стационарно.

Это означает, что скорость изнашивания в произвольно выбранных точках звеньев 1, 2 изменяется по периодическому закону. Поэтому для определения величины износа в любой точке поверхности звена 2 за время обработки t достаточно проинтегрировать выражение (4) от нуля до t :

$$t_{ц2} = \frac{2\pi}{\omega_2}, \quad (11)$$

где $t_{ц2}$ — время одного цикла (полного оборота точки a_i вокруг точки O_1), а затем умножить полученный результат на число циклов за полное время обработки:

$$n_{ц2} = \frac{\omega_2 t}{2\pi}. \quad (12)$$

Таким образом, осуществляется замена переменной интегрирования с t на φ . На основании сделанных допущений соотношение u_i/u_1 для звена 2 приобретает следующий вид (при $\rho_1(R) = \rho_0$):

$$\frac{u_i}{u_1} = \left[\frac{P_1(r_i)}{P_1(\bar{r}_i)} \right]^y \frac{\int_0^{2\pi} \sqrt{Ar_i^2 + B_1 r_i \cos \varphi + C_1}}{\int_0^{2\pi} \sqrt{A\bar{r}_i^2 + B_1 \bar{r}_i \cos \varphi + C_1}} \quad (13)$$

Формула (13), отражающая действие кинематических факторов, была использована при расчете распределения величин износа при ХМП подложек диаметром 100 мм. Зависимости распределения величин u_i/u_1 вдоль радиуса подложки при фиксированной частоте вращения полировальника (звено 1) и варьируемой частоте вращения звена 2 с закрепленной на нем подложкой приведены на рис. 4. При проведении расчетов сделано допущение об однородности поля давления и поля плотности абразивной среды. Можно заметить, что распределение величин износа вдоль радиуса подложки существенно зависит от кинематических факторов, изменяясь от равномерного при плоскопараллельном движении подложки по поверхности полировальника до сильно выраженного увеличения от центра к периферии подложки. Форма обработанной поверхности подложки при этом становится выпуклой.

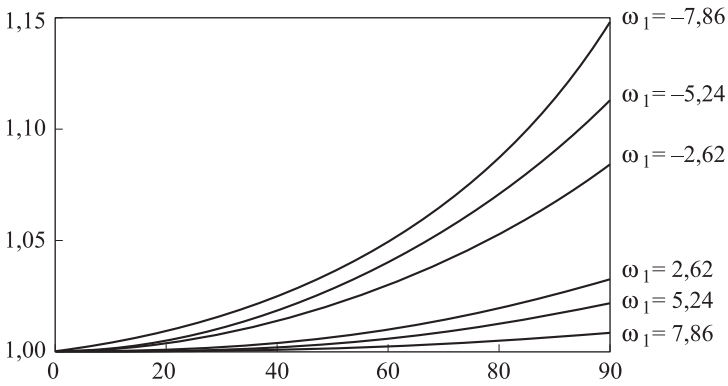


Рис. 4. Распределение величин u_i/u_1 вдоль радиуса подложки:

$$\omega_1 = 9,1 \text{ 1/c}; \omega_2 = \text{var}; \rho(R) = \rho_0 = \text{const}$$

Формула для определения соотношений u_i/u_1 при распределении $\rho_1(R)$ по закону (10) имеет вид

$$\frac{u_i}{u_1} = \frac{\left[\frac{R_1(r_i)}{R_1(r_1)} \right]^y \int_0^{2\pi} \left(L_2 - \sqrt{\frac{br_i^2 + a_1 r_i \cos \varphi - n_1}{m}} \right) \sqrt{Ar_i^2 + B_1 r_i \cos \varphi + C_1} d\varphi}{\int_0^{2\pi} \left(L_2 - \sqrt{\frac{br_1^2 + a_1 r_1 \cos \varphi - n_1}{m}} \right) \sqrt{Ar_1^2 + B_1 r_1 \cos \varphi + C_1} d\varphi}. \quad (14)$$

На рис. 5 приведены результаты расчетов распределения величин u_i/u_1 вдоль радиуса подложки для различных значений параметра L_2 . Очевидно, что уменьшение параметра L_2 параметрической линейной зависимости (10) приводит к уменьшению плотности абразивной среды от центра полировальника к периферии, величина износа уменьшается от центра к периферии, а форма обработанной поверхности подложки становится вогнутой.

Предложенная модель для определения скорости локального износа (1) и интегральная математическая модель (2) могут быть использованы для моделирования процессов абразивной доводки свободным и связанным абразивом, абразивного полирования и химико-механического полирования.

Результаты вычислительных экспериментов, проведенных с использованием математических моделей (13, 14), позволяют сделать вывод о возможности эффективного управления процессом методом химико-

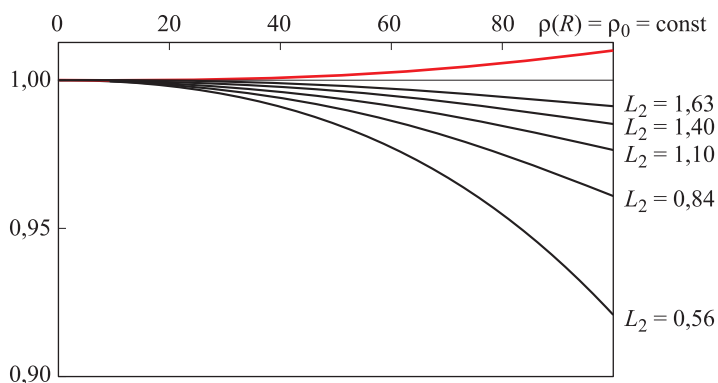


Рис. 5. Распределение величин u_i/u_1 вдоль радиуса подложки

$$\omega_1 = 9,1 \text{ 1/с}; \omega_2 = 7,86 \text{ 1/с}; \rho(R) = \frac{P_0}{L_1}(L_2 - R)$$

механической планирования для повышения коэффициента планирования поверхности подложек.

Исследования проведены в пределах поисковой научно-исследовательской работы в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг. и могут быть использованы при разработке новых методов и средств планирования поверхностей подложек в микро- и нанoeлектронике и микро- и наносистемной технике, а также при проектировании операций химико-механического полирования.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Холевин В.В. Исследование процесса химико-механического полирования деталей и узлов микросистемной техники. *Наука и Образование: электронное научно-техническое издание*, 2011, вып. 10. URL: <http://technomag.edu.ru/issue/207707.html> (дата обращения 10.10.11).
- [2] Нестеров Ю.И., Скворцов К.Ф., Холевин В.В. Прогрессивные методы финишной обработки монокристаллических подложек ИС. *Труды МВТУ*, 1980, № 331. *Технологические проблемы производства электронно-вычислительной аппаратуры*, с. 20–39.
- [3] Варадан В., Виной К., Джозе К. *ВЧ МЭМС и их применение*. Москва, Техносфера, 2004, 528 с.
- [4] Sniegowski J.J. Chemical-mechanical polishing: enhancing the manufacturability of MEMS. *Intelligent Micromachines Department*, Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM 87185.-spie96-3.pdf.
- [5] Lebrecht von Trotha et al. Advanced MEMS fabrication using CMP. *Semiconductor International*, 8/1/2004.
- [6] Гольдштейн Р.В., Осипенко М.Н. Химико-механическое полирование. Часть 1. Основные закономерности: обзор. *Вестник Пермского Государственного технического университета*, 2011, № 3, с. 26–42.

- [7] Гольдштейн Р.В., Осипенко М.Н. Химико-механическое полирование. Часть 2. Модель локального взаимодействия. *Вестник Пермского Государственного технического университета*, 2011, № 3, с. 43–57.

Статья поступила в редакцию 16.07.2013

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Холевин В.В. Некоторые особенности планаризации поверхности подложек изделий микро- и наносистемной техники. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, вып. 6. URL: <http://engjournal.ru/catalog/nano/hidden/803.html>

Холевин Владимир Викторович — канд. техн. наук, доцент кафедры «Радиоэлектронные системы и комплексы» МГТУ им. Н.Э. Баумана. e-mail: Kholevin@mail.ru