

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-6-477-486>

УДК 621.923

Обеспечение равномерности съема припуска при магнитно-абразивной финишной обработке полупроводниковых пластин за счет управления режимами процесса обработки

Докт. техн. наук Д. А. Степаненко¹⁾, асп. Е. С. Еромин¹⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2023
Belarusian National Technical University, 2023

Реферат. В статье описана методика решения прямых и обратных задач моделирования процесса магнитно-абразивной финишной обработки (МАФО) полупроводниковых пластин. Решение прямой задачи позволяет производить расчет функции съема припуска при заданных параметрах обработки, а решение обратной задачи – расчет значений параметров обработки, требуемых для реализации заданной функции съема припуска. Прямая задача решается на основе уравнения Престона, обычно используемого для описания скорости съема припуска при полировании оптических деталей. Обратная задача рассматривается в матричной формулировке, а ее решение в смысле наименьших квадратов определяется с помощью обобщенной обратной матрицы Мура–Пенроуза. На основе решения прямой задачи с постоянными значениями кинематических и магнитных параметров обработки показано, что МАФО при постоянных значениях параметров не обеспечивает равномерности съема припуска. На основе численных примеров показано, что близкий к равномерному съем припуска может быть обеспечен за счет управления магнитными параметрами обработки, закон изменения которых определяется путем решения обратной задачи. Показано, что гладкость решения исходной плохо обусловленной обратной задачи может быть повышена путем ее регуляризации, по Тихонову, что, в свою очередь, технически упрощает управление параметрами обработки.

Ключевые слова: магнитно-абразивная финишная обработка; полупроводниковые пластины; равномерность съема припуска; уравнение Престона; плохо обусловленные обратные задачи; регуляризация, по Тихонову

Для цитирования: Степаненко, Д. А. Обеспечение равномерности съема припуска при магнитно-абразивной финишной обработке полупроводниковых пластин за счет управления режимами процесса обработки / Д. А. Степаненко, Е. С. Еромин // *Наука и техника*. 2023. Т. 22, № 6. С. 477–486. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-6-477-486>

Ensuring Uniform Material Removal with Magnetic Abrasive Finishing of Semiconductor Wafers by Mode Control of Machining Parameters

D. A. Stepanenko, E. S. Eromin

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The paper describes a solution technique for direct and inverse problems of modeling the process of magnetic abrasive finishing (MAF) of semiconductor wafers. Solution of the direct problem enables calculation of allowance removal

Адрес для переписки

Степаненко Дмитрий Александрович
Белорусский национальный технический университет
ул. Я. Коласа, 22,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 293-91-01
stepd@tut.by

Address for correspondence

Stepanenko Dmitry A.
Belarusian National Technical University
22, Ya. Kolasa str.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 293-91-01
stepd@tut.by

function for the prescribed machining parameters, and solution of the inverse problem enables determination of machining parameters required for realization of the prescribed allowance removal function. The direct problem is solved by means of Preston equation, which is usually used for description of material removal rate when polishing optical parts. The inverse problem is considered in a matrix formulation, and its least squares solution is determined by means of generalized inverse Moore-Penrose matrix. Based on the solution of the direct problem with constant values of kinematic and magnetic machining parameters shows that MAF with constant values of machining parameters does not ensure uniformity of material removal. On the basis of numerical examples it is shown that close to uniform material removal can be ensured by control of magnetic machining parameters with the law of variation determined from solution of the inverse problem. It is demonstrated that the smoothness of solution of the initial ill-conditioned inverse problem can be improved by means of Tikhonov's regularization, which in turn technically simplifies control of machining parameters.

Keywords: magnetic abrasive finishing, semiconductor wafers, uniformity of material removal, Preston equation, ill-conditioned inverse problems, Tikhonov's regularization

For citation: Stepanenko D. A., Eromin E. S. (2023) Ensuring Uniform Material Removal with Magnetic Abrasive Finishing of Semiconductor Wafers by Mode Control of Machining Parameters. *Science and Technique*. 22 (6), 477–486. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-6-477-486> (in Russian)

Введение

Магнитно-абразивная финишная обработка (МАФО) представляет собой способ финишной обработки поверхностей, основанный на создании силы резания путем воздействия магнитного поля на частицы ферро-абразивного (магнитно-абразивного) порошка (ФАП), в качестве которого могут применяться композиционные материалы на основе технического железа (магнитная фаза) и электрокорунда, алмаза или карбидов вольфрама, молибдена, ниобия и титана (абразивная фаза) [1]. Под действием магнитного поля ФАП может приобретать условно связанное состояние с формированием так называемой абразивной щетки, жесткость которой может регулироваться путем изменения характеристик магнитного поля. Таким образом, путем регулировки режимов МАФО можно в зависимости от требований к характеристикам обработанной поверхности реализовать процесс обработки, близкий к обработке свободным или связанным абразивом. При МАФО количество режущих элементов на единицу площади обрабатываемой поверхности значительно выше, чем при традиционном шлифовании, что позволяет в отличие от шлифования обеспечить высокую производительность обработки при малых давлениях на обрабатываемую поверхность, что, в свою очередь, приводит к существенному уменьшению глубины дефектного слоя. Одним из перспективных направлений применения МАФО является обработка пластин из кремния и других полупроводниковых материалов [1, с. 188; 2].

Традиционно финишная обработка кремниевых пластин производится методом химико-

механического полирования (ХМП), основанном на использовании абразивной суспензии, содержащей сильный окислитель, например пероксид водорода [3]. Очевидным недостатком такой технологии является необходимость использования вредных для здоровья человека и окружающей среды химических реактивов.

Важная характеристика поверхностей кремниевых пластин – их шероховатость: среднеарифметическое значение шероховатости Sa по поверхности (двумерное обобщение известного параметра Ra), достижимое с помощью ХМП, составляет 0,4 нм [4]. Как показывают исследования, шероховатость поверхности раздела полупроводниковой подложки и диэлектрического затвора оказывает существенное влияние на подвижность носителей заряда в электронных устройствах типа МДП-транзисторов и соответственно на их работоспособность [5].

Вторая важная характеристика кремниевых пластин, которую требуется обеспечить при их обработке, – общее изменение (отклонение) толщины по пластине TTV (Total Thickness Variation) [6]. Требования к этому параметру становятся все более жесткими с уменьшением размеров элементов микросхем. Предельно достижимый размер элементов микросхемы при фотолитографии обратно пропорционален числовой апертуре используемого объектива, а глубина резкости обратно пропорциональна квадрату числовой апертуры [6]. Как следствие, миниатюризация элементов микросхемы сопровождается значительным уменьшением глубины резкости, что, в свою очередь, приводит к повышенным требованиям к плоскостности пластин, так как отклонения от плоскостно-

сти не должны превышать глубины резкости. Для сверхплоских кремниевых пластин параметр TTV не должен превышать 1 мкм. МАФО способна обеспечивать требуемые для кремниевых пластин значения шероховатости (0,7–2,0 нм по параметру Ra) и минимальную глубину дефектного слоя [1], однако обеспечение равномерного съема припуска (и, как следствие, минимальных отклонений от плоскостности) требует управления скоростью съема припуска и/или продолжительностью контакта инструмента с различными участками поверхности заготовки в зависимости от положения инструмента относительно заготовки. Данная статья посвящена исследованию возможности повышения равномерности съема припуска при МАФО пластин из полупроводниковых материалов за счет управления режимами процесса обработки.

Прямая задача моделирования процесса МАФО

При моделировании съема припуска будем считать, что скорость съема припуска может быть рассчитана по формуле Престона [7, 8]:

$$RR(\rho, \varphi, t) = k \cdot p(\rho, \varphi, \rho_c(t), \varphi_c(t))v(\rho, \varphi, \rho_c(t), \varphi_c(t)), \quad (1)$$

где k – коэффициент, зависящий от условий обработки; $p(\rho, \varphi, \rho_c(t), \varphi_c(t))$ – давление инструмента на обрабатываемую поверхность в точке с координатами (ρ, φ) в момент времени t , соответствующий расположению оси вращения инструмента в точке (ρ_c, φ_c) ; $v(\rho, \varphi, \rho_c(t), \varphi_c(t))$ – скорость движения точки (ρ, φ) относительно инструмента.

Для упрощения модели считаем коэффициент k постоянным и не будем учитывать его в дальнейшем анализе. При моделировании рассматривается кинематика, представляющая собой сочетание вращательного движения заготовки с угловой скоростью Ω , вращательного движения инструмента (полюсного наконечника магнитной системы) с угловой скоростью ω и радиального поступательного движения инструмента со скоростью v_r .

Функция съема припуска может быть определена путем интегрирования уравнения (1)

$$h(\rho, \varphi) = \int_0^T RR(\rho, \varphi, t)dt, \quad (2)$$

где T – общая продолжительность процесса обработки.

Прямая задача моделирования процесса МАФО состоит в определении функции (2) при известной скорости (1) съема припуска и легко решается путем численного интегрирования. Для решения прямой задачи в двумерной постановке введем на поверхности обрабатываемой пластины регулярную сетку точек, лежащих на концентрических окружностях с радиусами $\rho_i = i\Delta\rho$, где $i = 0 \dots N_r$, $\Delta\rho = R/N_r$, R – радиус пластины. В случае равномерного окружного распределения точек с угловым шагом $\Delta\varphi = 2\pi/N_a$ они будут иметь угловые координаты $\varphi_j = j\Delta\varphi$, где $j = 0 \dots N_a - 1$. Если ρ_c – текущее значение радиальной координаты оси вращения инструмента, а φ_c – текущее значение ее угловой координаты, то точка $P_{ij}(\rho_i, \varphi_j)$ поверхности пластины принадлежит области проекции полюсного наконечника при выполнении следующих условий:

$$\rho_c - r \leq \rho_i \leq \rho_c + r; \quad (3)$$

$$\varphi_c - \arcsin(r/\rho_c) \leq \varphi_j \leq \varphi_c + \arcsin(r/\rho_c); \quad (4)$$

$$\rho_c^2 + \rho_i^2 - 2\rho_c\rho_i \cos(\varphi_c - \varphi_j) \leq r^2, \quad (5)$$

где r – радиус полюсного наконечника; $2\arcsin(r/\rho_c)$ – угол охвата зоны обработки.

Условие (5) является достаточным, однако его непосредственная проверка для всего массива точек требует значительных затрат времени на вычисления. В связи с этим вводятся два избыточных условия (3)–(4), позволяющих сузить множество индексов (i, j) , для которых требуется проверка условия (5). В случае $\rho_c(t) \geq r$ проверка (5) проводится для значений индексов, лежащих в следующих диапазонах:

$$\begin{aligned} \text{ceil}((\rho_c - r)/\Delta\rho) \leq i \leq \\ \leq \min(\text{floor}((\rho_c + r)/\Delta\rho), N_r); \end{aligned} \quad (6)$$

$$j_1 \leq j \leq j_2 \text{ при условии } j_2 \geq j_1;$$

$$(0 \leq j \leq j_2) \cup (j_1 \leq j \leq N_a - 1) \text{ при условии } j_2 < j_1;$$

$$j_1 = \text{if}(\text{ceil}(\text{mod}(\varphi_c - \arcsin(r/\rho_c), 2\pi)/\Delta\varphi) = N_a, 0, \text{ceil}(\text{mod}(\varphi_c - \arcsin(r/\rho_c), 2\pi)/\Delta\varphi));$$

$$j_2 = \text{floor}(\text{mod}(\varphi_c + \arcsin(r/\rho_c), 2\pi)/\Delta\varphi),$$

где ceil – оператор округления до ближайшего большего целого значения; floor – оператор округления до ближайшего меньшего целого значения; $\text{mod}(a, b)$ – остаток от деления числа a на число b ; функция $\text{if}(\text{cond}, \text{val1}, \text{val2})$ принимает значение val1 при $\text{cond} = 1$ (истинное логическое условие) и val2 при $\text{cond} = 0$ (ложное логическое условие).

В формуле (6) при определении верхней границы изменения индекса i значение N_r принимается в случае, когда $\rho_c(t) > R - r$, то есть полюсный наконечник имеет неполное перекрытие с поверхностью заготовки. Случай $j_2 < j_1$ возникает при пересечении зоной обработки радиуса пластины $\varphi = 0$.

Функция mod приводит углы к диапазону $[0, 2\pi)$, а функции ceil и floor дают диапазоны значений $[1, N_a]$ и $[0, N_a - 1]$. Так как по определению значения индекса j должны лежать в диапазоне $[0, N_a - 1]$, то в случае $\text{ceil}(\text{mod}(\varphi_c - \arcsin(r/\rho_c), 2\pi)/\Delta\varphi) = N_a$ нижняя граница изменения индекса j принимается равной нулю, что описывается с помощью функции if .

При $\rho_c(t) < r$ условие (5) проверяется для всех значений индекса j , так как понятие угла охвата зоны обработки теряет в этом случае смысл и для индексов i , удовлетворяющих условию

$$0 \leq i \leq \text{floor}((\rho_c + r)/\Delta\rho).$$

При моделировании рассматривались следующие варианты начальных условий:

$$\rho_c(0) = R - r, \varphi_c(0) = \pi, \rho_c(T) = r; \quad (7)$$

$$\rho_c(0) = R, \varphi_c(0) = \pi, \rho_c(T) = r; \quad (8)$$

$$\rho_c(0) = R, \varphi_c(0) = \pi, \rho_c(T) = 0. \quad (9)$$

Начальное условие $\varphi_c(0) = \pi$ удобно использовать, так как в этом случае угол $\varphi_c - \arcsin(r/\rho_c)$ все время остается положительным.

Пластину будем условно считать неподвижной, а полюсный наконечник – совершающим радиальное движение подачи с линейной скоростью v_r в сочетании с вращательным дви-

жением относительно оси симметрии пластины с угловой скоростью Ω . В этом случае:

$$\rho_c(t) = \rho_c(0) - v_r t;$$

$$\varphi_c(t) = \varphi_c(0) + \Omega t;$$

$$T = (\rho_c(0) - \rho_c(T))/v_r.$$

При моделировании будет использоваться дискретная временная переменная:

$$t_k = k\Delta t;$$

$$k = 0 \dots N_t;$$

$$\Delta t = T/N_t.$$

Давление p будет считаться постоянным в области проекции полюсного наконечника, однако в случае необходимости в рассматриваемую модель может быть без труда введена истинная функция распределения давления, определенная расчетным или экспериментальным путем. Скорость v движения точки P поверхности заготовки относительно инструмента определялась по формуле

$$v_P = \sqrt{v_{\perp}^2 + v_{\parallel}^2},$$

где v_{\perp} – составляющая скорости, перпендикулярная радиус-вектору оси вращения инструмента; v_{\parallel} – составляющая скорости, параллельная радиус-вектору оси вращения инструмента.

Составляющие скорости рассчитывались по формулам:

$$v_{\perp} = \omega d \cdot \cos(\theta) + \Omega \rho_i \cos(\varphi_c(t_k) - \varphi_j);$$

$$v_{\parallel} = \omega d \cdot \sqrt{1 - \cos^2(\theta)} + \Omega \rho_i \sqrt{1 - \cos^2(\varphi_c(t_k) - \varphi_j)} + v_r,$$

где $d = \sqrt{\rho_c^2(t_k) + \rho_i^2 - 2\rho_c(t_k)\rho_i \cos(\varphi_c(t_k) - \varphi_j)}$ – расстояние между точкой поверхности заготовки и осью вращения инструмента; $\cos(\theta) = (\rho_i \cos(\varphi_c(t_k) - \varphi_j) - \rho_c(t_k))/d$ – косинус угла между радиус-вектором оси вращения инструмента и вектором, соединяющим рассматриваемую точку поверхности заготовки с осью вращения инструмента.

Для расчета функции (2) вводилась матрица $\{h_{\Sigma}\}$ съема припуска с нулевыми начальными значениями элементов. Если в момент времени t_k точка P_{ij} находится в области обработки, то значение соответствующего ей элемента матрицы $\{h_{\Sigma}\}$ увеличивается на величину $v_P(t_k)\Delta t$. Для определения истинных значений съема припуска полученную таким образом матрицу нужно умножить на коэффициент k , характеризующий условия обработки, и давление p в зоне обработки, однако для качественного анализа возникающих при обработке отклонений формы можно принять $k = 1$ и $p = 1$.

Результаты расчета при начальных условиях (7)–(9) приведены на рис. 1.

Расчет производился при следующих исходных данных: $R = 150$ мм; радиус полюсного наконечника $r = 10$ мм; $\Omega = 1$ об/с; $\omega = 10$ об/с; $v_f = 1$ мм/с; $N_f = 150$; $N_a = 360$; $\Delta t = 0,56$ мс.

Все рассмотренные случаи характеризуются значительной неравномерностью съема припуска. В случае начальных условий (7) наблюдается «краевой эффект», состоящий в снижении величины съема припуска до нуля в центре

и на периферии заготовки, не пересекаемых инструментом в процессе обработки. В случае начальных условий (8) краевой эффект не периферии заготовки становится менее выраженным, так как инструмент пересекает ее в процессе обработки. Аналогичным образом при начальных условиях (9) снижается краевой эффект в центре заготовки. Кривые, аналогичные представленным на рис. 1, были ранее получены при исследовании имеющего схожую кинематику процесса напыления покрытий на поверхность вращающегося диска [9]. Таким образом, для исключения возникновения краевого эффекта инструмент должен пересекать при обработке центр и периферию заготовки. Что касается неравномерности съема припуска вне зоны краевого эффекта, она сохраняется во всех рассмотренных случаях и для ее компенсации требуется управление режимами обработки, которое может быть реализовано несколькими способами, вытекающими из уравнения (1), за счет изменения:

- 1) кинематических параметров процесса обработки (скорости v).
- 2) давления p .

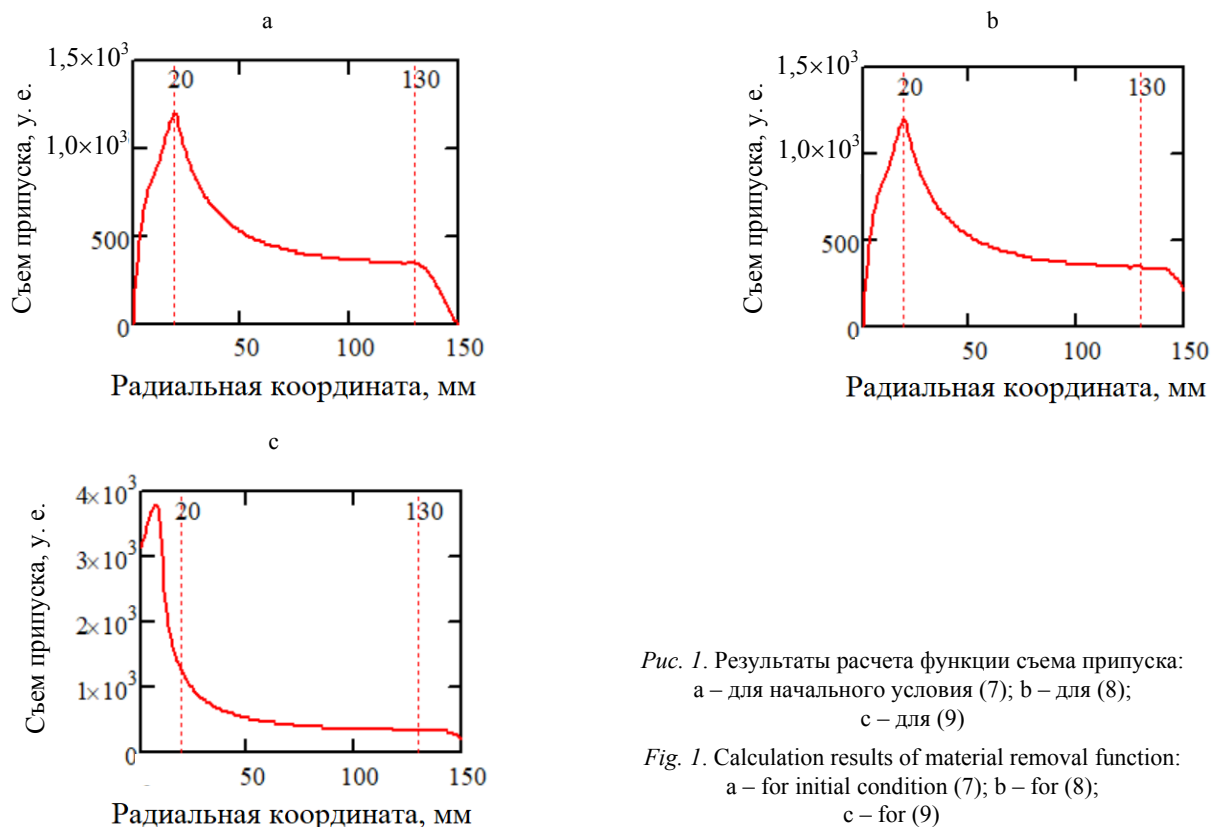


Рис. 1. Результаты расчета функции съема припуска: а – для начального условия (7); б – для (8); в – для (9)

Fig. 1. Calculation results of material removal function: а – for initial condition (7); б – for (8); в – for (9)

Предпочтение следует отдать второму способу, так как давление p влияет на скорость съема припуска линейным образом (в отличие от кинематических параметров Ω , ω и v_r), хотя существуют исследования, посвященные управлению съемом припуска при МАФО за счет изменения кинематических параметров [10]. Так как давление при МАФО определяется характеристиками магнитного поля [11], технически возможны следующие варианты его регулирования:

1) изменение индукции магнитного поля за счет регулирования силы тока, протекающего через обмотку электромагнита (для магнитных систем на основе электромагнитных индукторов);

2) варьирование величины воздушного зазора между полюсным наконечником и поверхностью заготовки (для магнитных систем на основе электромагнитных индукторов и постоянных магнитов);

3) изменение скважности импульсов магнитного поля при фиксированной частоте их повторения (широотно-импульсная модуляция) (для магнитных систем на основе электромагнитных индукторов при обработке в импульсных магнитных полях).

Обратная задача моделирования процесса МАФО

Рассматриваемая в данном разделе обратная задача состоит в определении закона регулирования давления p при МАФО, обеспечивающего заданное (близкое к равномерному) распределение величины съема припуска по поверхности заготовки. Для вывода описывающих обратную задачу уравнений рассмотрим одномерную функцию съема припуска

$$h_{1D}(\rho) = h(\rho, 0)$$

и представим ее в виде суммы функций съема за один оборот заготовки (пооборотных функций съема):

$$h_{1D}(\rho) = \sum_{k=1}^{N+1} \int_{t(k)}^{t(k+1)} RR(\rho, 0, t) dt = \sum_{k=1}^{N+1} h_k(\rho), \quad (10)$$

где N – число полных оборотов заготовки за время T ; $t(k) = 2\pi(k-1)/\Omega$ при $k \leq N + 1$; $t(N+2) = T$.

Функции $h_k(\rho)$ рассчитываются путем численного интегрирования функции (1) скорости съема припуска на интервале $(t(k); t(k+1))$.

Как было показано в предыдущем разделе, при постоянных режимах обработки функция $h_{1D}(\rho)$ является непостоянной, что соответствует возникновению при обработке отклонений формы. Для минимизации этих отклонений необходимо, чтобы функция $h_{1D}(\rho)$ принимала близкое к постоянному значение, что может быть достигнуто заменой суммирования в выражении (10) взвешенным суммированием:

$$h_{1D}(\rho) = \sum_{k=1}^{N+1} w_k h_k(\rho), \quad (11)$$

где весовые коэффициенты w_k должны быть подобраны таким образом, чтобы обеспечить минимальное отклонение функции $h_{1D}(\rho)$ от заданного значения.

С технической точки зрения, введение весовых коэффициентов в выражении (11) соответствует пропорциональному изменению давления p при обработке. Таким образом, обратная задача моделирования процесса МАФО может быть сведена к определению весовых коэффициентов w_k в выражении (11), обеспечивающих минимальное отклонение одномерной функции $h_{1D}(\rho)$ съема припуска от заданного постоянного значения. Для решения этой задачи представим выражение (11) в дискретной форме

$$h_{\text{opt}(i)} = \sum_{k=1}^{N+1} w_k h_{i,k}, \quad (12)$$

где $h_{\text{opt}(i)} = h_{\text{opt}}(\rho_i)$; $h_{i,k} = h_k(\rho_i)$; $\rho_i = (i-1)R/(N_r - 1)$, $i = 1 \dots N_r$; $h_{\text{opt}}(\rho)$ – требуемое (оптимальное) распределение одномерной функции $h_{1D}(\rho)$ съема припуска.

Уравнение (12) может быть записано в матричной форме

$$\{\mathbf{h}\} \mathbf{w} = \mathbf{h}_{\text{opt}}, \quad (13)$$

где $\{\mathbf{h}\}$ – матрица пооборотного съема припуска, столбцы которой соответствуют дискретизированным значениям пооборотных функций съема $h_k(\rho)$; \mathbf{w} – вектор весовых коэффициентов; \mathbf{h}_{opt} – вектор оптимального распределения съема припуска.

Как было показано ранее (рис. 1), при перемещении инструмента из положения $\rho_c(0) = R - r$ в положение $\rho_c(T) = r$ функция $h_{1D}(\rho)$, рассчитанная для постоянных режимов обработки, характеризуется наличием зон краевого эффекта $\rho \geq R - 2r$ и $\rho \leq 2r$, в которых величина съема припуска плавно снижается до нуля. Поэтому

оптимальное распределение $h_{\text{opt}}(\rho)$ съема припуска должно задаваться в виде трапецеидальной функции

$$h_{\text{opt}}(\rho) = h_0 \cdot \text{if}(\rho \geq R - 2r, (R - \rho)/2r, \text{if}(\rho \leq 2r, \rho/2r, 1)).$$

Так как матрица $\{\mathbf{h}\}$ в (13) в общем случае является прямоугольной, для решения этого уравнения требуется использование обобщенной обратной (псевдообратной) матрицы Мура–Пенроуза:

$$\{\mathbf{h}\}^+ = (\{\mathbf{h}\}^T \{\mathbf{h}\})^{-1} \{\mathbf{h}\}^T; \quad \mathbf{w} = \{\mathbf{h}\}^+ \mathbf{h}_{\text{opt}}, \quad (14)$$

где индекс T обозначает транспонирование матрицы.

Численный анализ показывает, что матрица $\{\mathbf{h}\}^T \{\mathbf{h}\}$ и соответственно рассматриваемая обратная задача моделирования процесса МАФО являются плохо обусловленными, что характерно для многих обратных задач. Как будет показано далее, представление решения обратной задачи в виде (14) дает достаточно точное (в смысле величины отклонения $\|\{\mathbf{h}\}\mathbf{w} - \mathbf{h}_{\text{opt}}\|$, где $\|\cdot\|$ – евклидова (ℓ_2) норма) решение, однако распределение весовых коэффициентов w_k является в этом случае недостаточно гладким, что делает затруднительным или невозможным соответствующее управление режимами обработки. Сглаживание решения и улучшение обусловленности задачи могут быть достигнуты путем регуляризации, по Тихонову, которая в простейшем варианте описывается уравнением [8]

$$\mathbf{w} = (\{\mathbf{h}\}^T \{\mathbf{h}\} + \lambda \mathbf{I})^{-1} \{\mathbf{h}\}^T \mathbf{h}_{\text{opt}},$$

где $\lambda > 0$ – параметр регуляризации; \mathbf{I} – единичная матрица.

Выбор параметра λ является компромиссной задачей, так как его увеличение приводит к повышению гладкости решения, однако при этом происходит потеря точности (увеличение отклонения $\|\{\mathbf{h}\}\mathbf{w} - \mathbf{h}_{\text{opt}}\|$).

В работах [9, 12], посвященных равномерности нанесения покрытий на поверхность вращающихся деталей, использовалось следующее интуитивное (не имеющее строгого математического обоснования, однако демонстрирующее практически приемлемые результаты) определение весовых коэффициентов:

$$w_k = \min(H)/H_k \leq 1; \quad (15)$$

$$H_k = \max(\{\mathbf{h}\}^{<k>}), \quad (16)$$

где индекс $<k>$ соответствует извлечению k -го столбца матрицы.

Технически подобное определение весовых коэффициентов соответствует снижению давления p при обработке обратно пропорционально максимальному значению пооборотного съема припуска, то есть на оборотах, соответствующих максимальному съему припуска будет прикладываться минимальное давление. Альтернативным вариантом является определение весовых коэффициентов через интегральное (или, что равносильно, среднее) значение пооборотного съема припуска. В этом случае

$$H_k = \sum_{i=1}^{N_r} h_{i,k}. \quad (17)$$

Оба описанных определения весовых коэффициентов будут использоваться в дальнейшем для оценки достоверности результатов, полученных путем решения регуляризованной обратной задачи.

На рис. 2 представлены графики изменения весовых коэффициентов, рассчитанных по формулам (15), (16) и (15), (17) для тех же исходных данных, что и приведенное выше решение прямой задачи.

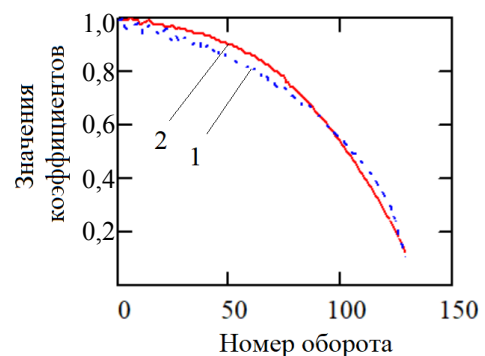


Рис. 2. Графики изменения весовых коэффициентов: 1 – расчет по формулам (15), (16); 2 – по (15), (17)

Fig. 2. Plots of variation in weight coefficients: 1 – calculation by formulas (15), (16); 2 – calculation by formulas (15), (17)

На рис. 3 представлен график оптимального распределения съема припуска и графики съема припуска, рассчитанные по формуле (11) с учетом приведенных на рис. 2 значений весовых коэффициентов.

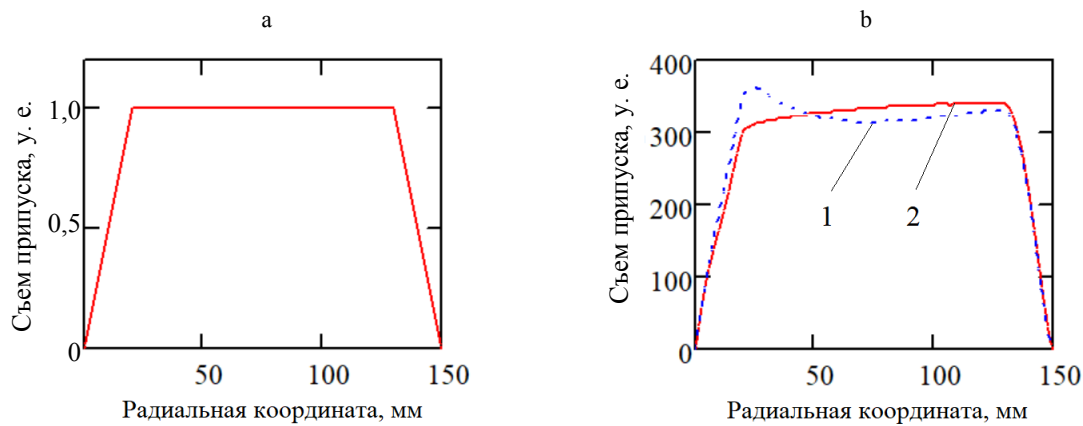


Рис. 3. Графики: а – оптимального распределения съема; б – рассчитанные по формуле (11); 1 – расчет весовых коэффициентов по (15), (16); 2 – то же по (15), (17)

Fig. 3. Plots of material removal: a – optimal distribution of removal; b – plots calculated by formula (11); 1 – calculation of weight coefficients by formulas (15), (16); 2 – calculation of weight coefficients by formulas (15), (17)

Как видно из графиков, распределение съема припуска становится значительно более равномерным по сравнению с распределениями, представленными на рис. 1, однако все же достаточно сильно отклоняется от оптимального, особенно в случае расчета весовых коэффициентов по (15), (16).

На рис. 4 представлены графики изменения весовых коэффициентов, рассчитанных путем решения нерегуляризованной и регуляризованной обратных задач.

На этих же графиках для сравнения приведено нормированное распределение весовых коэффициентов, рассчитанных по (15), (17). Нормировка производилась путем умножения на постоянный коэффициент, минимизирую-

щий среднеквадратическое отклонение между коэффициентами, рассчитанными двумя способами. Как видно из графиков, общая тенденция изменения весовых коэффициентов соответствует расчету по (15), (17), однако для изменения коэффициентов, рассчитанных путем решения обратных задач, характерна более высокая степень колебательности. Как предсказывает теория, решение регуляризованной обратной задачи является более гладким по сравнению с решением нерегуляризованной задачи.

На рис. 5 представлены графики съема припуска, рассчитанные по формуле (11) с учетом значений весовых коэффициентов, полученных путем решения обратных задач.

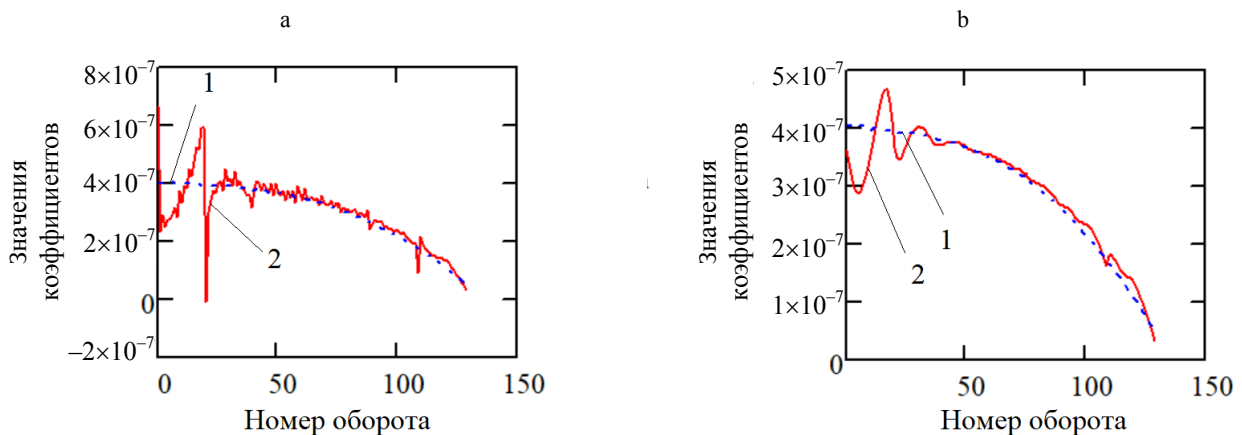


Рис. 4. Графики изменения весовых коэффициентов: а – расчет путем решения нерегуляризованной обратной задачи; б – то же путем решения регуляризованной обратной задачи; 1 – расчет по формулам (15), (17); 2 – решение обратной задачи

Fig. 4. Plots of variation in weight coefficients: а – calculation using solution of non-regularized inverse problem; б – calculation using solution of regularized inverse problem; 1 – calculation by formulas (15), (17); 2 – solution of inverse problem

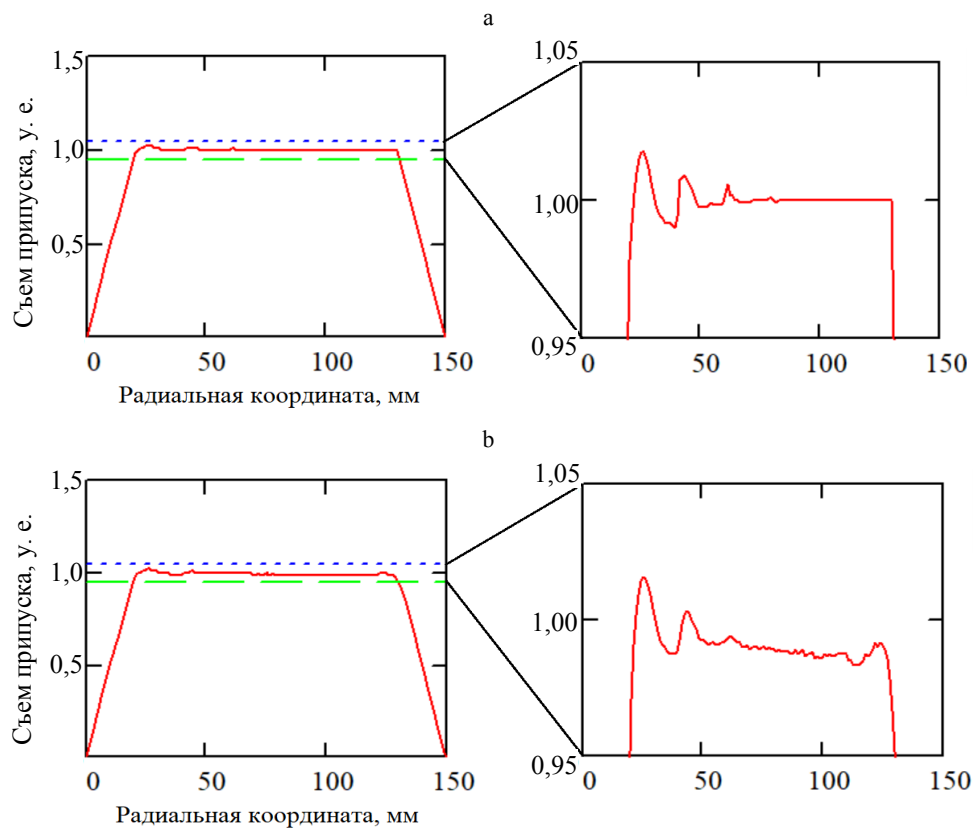


Рис. 5. Графики съема припуска: а – расчет весовых коэффициентов путем решения нерегуляризованной обратной задачи; б – то же регуляризованной обратной задачи

Fig. 5. Plots of material removal: a – calculation of weight coefficients using solution of non-regularized inverse problem; b – calculation of weight coefficients using solution of regularized inverse problem

В обоих случаях (для нерегуляризованной и регуляризованной обратных задач) расчетные распределения съема припуска достаточно близки к требуемому оптимальному распределению. Как предсказывает теория, для решения регуляризованной задачи характерно более сильное отклонение расчетного распределения от требуемого оптимального.

На практике важной является не только задача о равномерном съеме припуска, но и более общая задача о съеме припуска по определенному закону, так как заготовка поступает на операцию МАФО с отклонениями от формы, возникшими на предшествующих операциях обработки, и соответственно возникает проблема коррекции этих отклонений (корректирующей обработки со съемом припуска по определенному закону) [10, 13]. Решение этой задачи будет рассмотрено в дальнейших исследованиях. Корректирующая обработка может производиться как методом МАФО [10], так и с помощью других методов, таких как локальное жидкостное травление [13], однако последний

способ требует применения химически агрессивных сред.

ВЫВОДЫ

1. Разработана методика решения прямых и обратных задач моделирования процесса МАФО полупроводниковых пластин, позволяющих рассчитывать функцию съема припуска при заданных параметрах обработки (прямая задача) и требуемые для реализации заданной функции съема припуска значения параметров обработки (обратная задача).

2. На основе анализа прямой задачи с постоянными значениями кинематических и магнитных параметров обработки показано, что обработка при постоянных значениях параметров не обеспечивает равномерности съема припуска.

3. На основе анализа обратной задачи показано, что управление магнитными параметрами обработки позволяет с достаточно высокой точностью реализовать заданную функцию съема припуска и, как частный случай, близкий к равномерному съему припуска.

4. Путем сравнительного анализа решения исходной обратной задачи и решения обратной регуляризованной, по Тихонову, задачи показано, что регуляризация позволяет повысить гладкость решения и соответственно упростить процесс управления параметрами обработки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Хомич, Н. С. Магнитно-абразивная обработка изделий / Н. С. Хомич. Минск: БНТУ, 2006. 217 с.
2. Mosavat, M. Nano-Finishing of the Monocrystalline Silicon Wafer Using Magnetic Abrasive Finishing Process / M. Mosavat // *Applied Optics*. 2019. Vol. 58, No 13. P. 3447–3453. <https://doi.org/10.1364/AO.58.003447>.
3. The use of Potassium Peroxodisulphate and Oxone® as Oxidizers for the Chemical Mechanical Polishing of Silicon wafers / A. Piñeiro [et al.] // *Wear*. 2013. Vol. 303, No 1–2. P. 446–450. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2013.03.030>.
4. An Efficient Approach for Atomic-Scale Polishing of Single-Crystal Silicon Via Plasma-Based Atom-Selective Etching / Z. Fang [et al.] // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2020. Vol. 159, Part B. Article 103649. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2020.103649>.
5. Influence of Silicon Wafer Surface Roughness on Semiconductor Device Characteristics / K. Mori [et al.] // *Japanese Journal of Applied Physics*. 2020. Vol. 59. Article SMMB06. <https://doi.org/10.35848/1347-4065/ab918c>.
6. Silicon Wafer Thickness Variation Measurements Using the National Institute of Standards and Technology Infrared Interferometer / T. L. Schmitz [et al.] // *Optical Engineering*. 2003. Vol. 42, No 8. P. 2281–2290. <https://doi.org/10.1117/1.1589757>.
7. Моделирование кинематики процесса магнитно-абразивного полирования кремниевых пластин / Н. С. Хомич [и др.] // *Вестник БНТУ*. 2009. № 1. С. 32–38.
8. Bouvier, C. Investigation of Polishing Algorithms and Removal Processes for a Deterministic Subaperture Polisher: PhD Thesis / C. Bouvier. – University of Rochester, 2007. 272 p.
9. Stepanenko, D. A. Modeling of Spraying with Time-Dependent Material Feed Rate / D. A. Stepanenko // *Applied Mathematical Modelling*. 2007. Vol. 31, No 11. P. 2564–2576. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2006.10.005>.
10. Zhang, Y. Study of Corrective Abrasive Finishing for Plane Surfaces Using Magnetic Abrasive Finishing Processes / Y. Zhang, Y. Zou // *Nanotechnology and Precision Engineering*. 2021. Vol. 4, No 3. Article 033001. <https://doi.org/10.1063/1.5004961>.
11. Modeling of Material Removal in Magnetic Finishing Based on Maxwell's Stress Tensor Theory and its Experimental Validation / X. He [et al.] // *Journal of Materials Processing Technology*. 2023. Vol. 312. Article 117808. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2022.117808>.
12. Киселев, М. Г. Исследование равномерности нанесения покрытий на примере напыления абразивной суспензии на поверхность ограниченного диска / М. Г. Киселев, Д. А. Степаненко // *Вестник БНТУ*. 2006. № 3. С. 51–56.
13. Improvement of Thickness Uniformity of Bulk Silicon Wafer by Numerically Controlled Local Wet Etching / M. Nagano [et al.] // *Journal of Crystal Growth*. 2009. Vol. 311, No 8. P. 2560–2563. <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2009.01.131>.

REFERENCES

1. Khomich N. S. (2006) *Magnetic Abrasive Treatment of products*. Minsk, Belarusian National Technical University. 217 (in Russian).
2. Mosavat M. (2019) Nano-Finishing of the Monocrystalline Silicon Wafer Using Magnetic Abrasive Finishing Process. *Applied Optics*, 58 (13), 3447–3453. <https://doi.org/10.1364/AO.58.003447>.
3. Piñeiro A., Black A., Medina J. C., Dieguez E., Parra V. (2013) The use of Potassium Peroxodisulphate and Oxone® as Oxidizers for the Chemical Mechanical Polishing of Silicon Wafers. *Wear*, 303 (1–2), 446–450. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2013.03.030>.
4. Fang Z., Zhang Y., Li R., Liang Y., Deng H. (2020) An Efficient Approach for Atomic-Scale Polishing of Single-Crystal Silicon Via Plasma-Based Atom-Selective Etching. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 159, Part B, 103649. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2020.103649>.
5. Mori K., Samata S., Mitsugi N., Teramoto A., Kuroda R., Suwa T., Hashimoto K., Sugawa S. (2020) Influence of Silicon Wafer Surface Roughness on Semiconductor Device Characteristics. *Japanese Journal of Applied Physics*, 59, Article SMMB06. <https://doi.org/10.35848/1347-4065/ab918c>.
6. Schmitz T. L., Davies A., Evans C. J., Parks R. E. (2003) Silicon Wafer Thickness Variation Measurements Using the National Institute of Standards and Technology Infrared Interferometer. *Optical Engineering*, 42 (8), 2281–2290. <https://doi.org/10.1117/1.1589757>.
7. Fedortsev R. V., Khomich N. S., Lougovik A. I., Korzun A. E., Kukhto P. V. (2009) Kinematics Modeling of Magnetic and Abrasive Silicon Wafer Polishing. *Vestnik BNTU*, (1), 32–38 (in Russian).
8. Bouvier C. (2007) *Investigation of Polishing Algorithms and Removal Processes for a Deterministic Subaperture Polisher: PhD Thesis*. University of Rochester. 272.
9. Stepanenko D. A. (2007) Modeling Of Spraying With Time-Dependent Material Feed Rate. *Applied Mathematical Modelling*, 31 (11), 2564–2576. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2006.10.005>.
10. Zhang Y., Zou Y. (2021) Study of Corrective Abrasive Finishing for Plane Surfaces Using Magnetic Abrasive Finishing Processes. *Nanotechnology and Precision Engineering*, 4 (3), Article 033001. <https://doi.org/10.1063/1.5004961>.
11. He X., Jin H., Zhou C., Gao C., Zhang G., Shiju E. (2023) Modeling of Material Removal in Magnetic Finishing Based on Maxwell's Stress Tensor Theory and its Experimental Validation. *Journal of Materials Processing Technology*, 312, Article 117808. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2022.117808>.
12. Kiselev M. G., Stepanenko D. A. (2006) Study of Uniformity of Coating Application Using the Example of Spraying an Abrasive Suspension Onto the Surface of a Cutting Disc. *Vestnik BNTU*, (3), 51–56 (in Russian).
13. Nagano M., Mitani T., Ueda K., Zettsu N., Yamamura K. (2009) Improvement of Thickness Uniformity of Bulk Silicon Wafer by Numerically Controlled Local Wet Etching *Journal of Crystal Growth*, 311 (8), 2560–2563. <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2009.01.131>.

Поступила 10.07.2023

Подписана в печать 12.09.2023

Опубликована онлайн 30.11.2023

Received: 10.07.2023

Accepted: 12.09.2023

Published online: 30.11.2023