

Двустороннее полирование подложек в производстве интегральных микросхем

77-48211/483344

06, июнь 2012

Данилов И. И.

УДК 621.923.74.

Россия, МГТУ им. Н.Э. Баумана

iidanilov@mail.ru

В серийном производстве интегральных микросхем применяют вариант технологии, в которой заданная точность размеров и формы подложки обеспечивается шлифованием, а требуемое качество поверхности – полированием. При этом полирование несколько ухудшает точность геометрической формы подложки, полученную ранее шлифованием.

Существует другой вариант технологии, в которой отсутствует шлифование, но используется *двустороннее формообразующее полирование* подложек.

Целью работы является разработка методики расчета процесса двустороннего формообразующего полирования.

Такое полирование обеспечивает исправление погрешностей геометрической формы заготовки, например, отрезанной от монокристалла полупроводникового кремния. Одновременно двустороннее полирование уменьшает глубину поверхностного нарушенного слоя и величину шероховатости рабочей поверхности. Необходимость удаления большого припуска при полировании определяет применение такого инструмента, который обеспечивает высокую производительность (размер абразивных зерен 1 – 3 мкм), а, следовательно, не может обеспечить полностью требуемое качество поверхности подложки. Поэтому после двустороннего формообразующего полирования применяют отделочное полирование. При этом трудоемкость отделочного полирования может быть значительно снижена благодаря уменьшению припуска на обработку рабочей стороны уже отполированных подложек.

Двустороннее полирование не всегда обеспечивает существенное уменьшение погрешностей заготовки: отклонение от параллельности сторон $\Delta_{\text{пс}}$, отклонение от плоскостности рабочей стороны $\Delta_{\text{п}}$, прогиб $\Delta_{\text{пр}}$. Контроль этих погрешностей в условиях крупносерийного производства подложек выполняется на приборах, имеющих емкостные датчики, бесконтактным

методом. Датчики сканируют обе поверхности подложки, затем вычисляются оценки погрешностей (рис. 1):

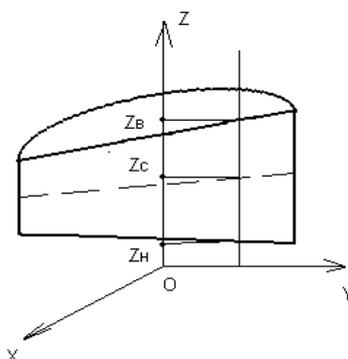


Рис. 1. Расчетная схема для определения погрешностей подложки

$$\Delta_{\text{пс}} = \Delta Z_{\text{max}} - \Delta Z_{\text{min}};$$

$$\Delta_{\text{п}} = Z_{\text{в}}^{\text{max}} - Z_{\text{в}}^{\text{min}} ;$$

$$\Delta_{\text{пр}} = Z_{\text{с}}^{\text{max}} - Z_{\text{с}}^{\text{min}} ,$$

где: ΔZ_{max} , ΔZ_{min} - соответственно, наибольшая и наименьшая толщина подложки;

$Z_{\text{в}}^{\text{max}}$, $Z_{\text{в}}^{\text{min}}$ - наибольшая и наименьшая аппликата верхней (рабочей) поверхности;

$Z_{\text{с}}^{\text{max}}$, $Z_{\text{с}}^{\text{min}}$ - наибольшая и наименьшая аппликата срединной поверхности, определяемой формулой:

$$Z_{\text{с}} = (Z_{\text{н}} + Z_{\text{в}})/2.$$

Двустороннее полирование существенно исправляет следующие погрешности заготовки: $\Delta_{\text{пс}}$, $\Delta_{\text{п}}$. Прогиб $\Delta_{\text{пр}}$ исправляет не во всех случаях.

В первом приближении процесс исправления погрешности $\Delta_{\text{пс}}$ при двустороннем полировании описывается дифференциальным уравнением:

$$\frac{d \Delta_{\text{пс}}(t)}{dt} = -k K v \Delta_{\text{пс}}(t),$$

имеющим решение:

$$\Delta_{\text{пс}}(t) = \Delta_{\text{пс}}(0) \exp (-t/T), \quad (1)$$

где: $\Delta_{\text{пс}}(0)$ – начальная погрешность заготовки;

$T = 1/ k K v$ – постоянная времени процесса полирования; (2)

$k = p/\delta$ – жесткость инструмента – полировальника; (3)

p – давление на полировальник;

δ – деформация полировальника;

K – коэффициент износа, характеризующий материал подложки и условия ее обработки при полировании [1];

v – скорость относительного движения подложки по полировальникам;

t – время полирования.

Это решение справедливо для такого набора технологических параметров, который обеспечивает устойчивое уменьшение погрешности $\Delta_{\text{пс}}$ заготовки. На практике возможны ситуации, в которых процесс полирования неустойчив, - может увеличивать погрешности исходных заготовок. Проблема устойчивости процесса двустороннего полирования не решена.

Решение (1) содержит постоянную времени T , которая зависит от ряда технологических факторов, применяемого оборудования и инструмента, а также материала подложки. Примерный диапазон величин $T = 15 - 40$ мин. Меньшие величины постоянной времени соответствуют более крупнозернистому абразиву полировальной суспензии, большей концентрации абразива в ней (параметр K), полировальникам, изготовленным из более жесткого материала (параметр k) и большей скорости v . Например, при $v = 1,1$ м/с, $k = 4,7 \cdot 10^8$ Па/м (полировальники из искусственной замши, наклеенной на стальные диски) и $K = 0,13 \cdot 10^{-11}$ Па⁻¹ (двустороннее полирование подложек из кремния КДБ 10 суспензией на основе алмазного порошка АСМ 3/2) постоянная времени $T = 1490$ с.

Расчет изменения при двустороннем полировании погрешностей $\Delta_{\text{п}}$, $\Delta_{\text{пр}}$ более сложен. При двустороннем полировании заготовка зажата между двумя упругими полировальниками. Подложки диаметром более 76 – 100 мм из кремния и других материалов имеют существенную величину погрешности заготовки $\Delta_{\text{пр}}$, которая получается при разрезании монокристалла на пластины. При двустороннем полировании заготовок, имеющих большой прогиб $\Delta_{\text{пр}}$, они частично упруго распрямляются между полировальниками, а после полирования опять приобретают первоначальную форму «вспоминая» величину $\Delta_{\text{пр}}$ заготовки. Расчет изменения (исправления) погрешностей заготовки $\Delta_{\text{п}}$, $\Delta_{\text{пр}}$ требует применения сложных математических моделей упругодеформированного состояния подложки при двустороннем полировании, в которых, например, используются четные функции Кельвина нулевого порядка. В настоящей статье такие модели не рассматриваются.

На полировальных станках обрабатывают несколько заготовок одновременно. Эти заготовки размещают в гнездах сепаратора, который удерживает их при полировании между двумя полировальниками. Обычно в эту группу заранее отбирают сортировкой одинаковые по толщине заготовки, чтобы условия упругого контакта с полировальниками были идентичными у всех подложек (при серийном производстве). Тогда, все заготовки в группе, в первом приближении, будут обрабатываться с одинаковыми постоянными времени T . Отличаться будут лишь исходные погрешности $\Delta_{\text{пс}}(0)$ и конечные результаты исправления $\Delta_{\text{пс}}(t)$ на каждой заготовке.

В условиях крупносерийного производства такую сортировку на каждом станке обычно не выполняют и на станок могут попасть заготовки с различной толщиной (в пределах операционного допуска). Тогда более «толстая» заготовка, зажата между полировальниками, будет подвержена большему давлению p , процесс полирования в соответствии с (2), (3) для нее будет характеризоваться меньшей величиной постоянной времени T за счет большей величины коэффициента износа K , который также зависит от давления, то есть на этой заготовке будет быстрее исправляться первоначальная погрешность $\Delta_{nc}(0)$, чем на других с меньшей толщиной. По мере обработки эта заготовка будет быстрее уменьшаться по толщине, чем другие. Различие в давлениях на разные заготовки в группе будет уменьшаться, следовательно постоянные времени для них будут сближаться по величине. Но это при длительном полировании, когда снимается большой припуск. Для малых припусков можно принять, что постоянная времени для i -ой заготовки в группе обратно-пропорциональна среднему давлению на нее:

$$T_i = \frac{a}{p_i}, \quad (4)$$

где: a – коэффициент пропорциональности, зависящий от условий обработки;
 $p_i = P_i/S$ – среднее давление на i -ю заготовку; (5)
 P_i – сила, действующая на i -ю заготовку со стороны полировальников;
 S – площадь рабочей поверхности подложки.

Перепишем (4) в виде:

$$T_i = \frac{a S}{P_i}.$$

Величина P_i определяется по расчетной схеме (рис. 2).

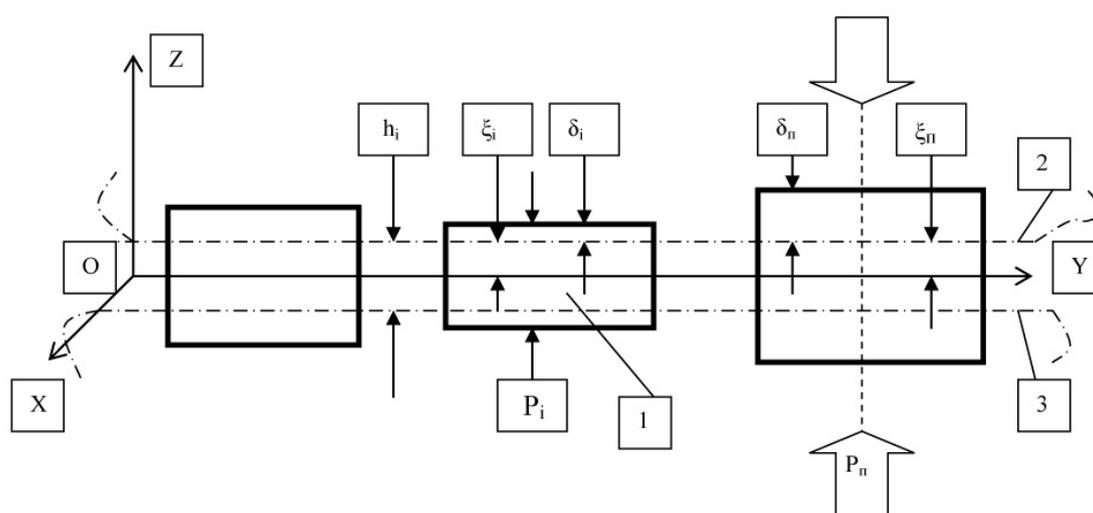


Рис. 2. Расчетная схема для определения силы P_i , действующей на i -ю заготовку 1, расположенную между верхним 2 и нижним 3 полировальниками

Для линейно-упругой модели полировальников:

$$p_i = k \delta_i, \quad (6)$$

где: δ_i – деформация полировальников (верхнего и нижнего) i – ой заготовкой.

С учетом рис. 2:

$$\delta_i = h_i/2 - \xi_i \quad (7)$$

где: h_i – толщина i – ой пластины;

ξ_i – величина, характеризующая взаимное расположение полировальников около i – ой заготовки.

Тогда для силы P_i с учетом (5), (6), (7):

$$P_i = k S (h_i/2 - \xi_i). \quad (8)$$

Величина ξ_i должна удовлетворять условию:

$$a x_i + b y_i + c \xi_i + d = 0, \quad (9)$$

где: $x_i ; y_i$ – координаты центра i – ой заготовки;

a, b, c, d – коэффициенты,

так как недеформированная поверхность полировальников – плоская.

С учетом (9) выражение (8) примет вид

$$P_i = k S \left(h_i/2 - \frac{a x_i + b y_i + d}{c} \right) \quad (10)$$

Условия статического равновесия всей системы (рис. 2):

$$\left. \begin{aligned} \sum P_i + P_n &= 0; \\ - \sum P_i x_i + P_n x_n &= 0; \\ \sum P_i y_i + P_n y_n &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

где: P_n – рабочая нагрузка на группу заготовок, приложенная вдоль прямой, пересекающей плоскость Oxy в точке (x_n, y_n) .

С учетом (9) система (11) после преобразований примет вид:

$$\left. \begin{aligned} a \sum x_i + b \sum y_i + d n - P_n c / k S + c \sum (h_i/2) &= 0; \\ a \sum x_i^2 + b \sum x_i y_i + d \sum x_i - P_n c x_n / k S + c \sum (h_i x_i / 2) &= 0; \\ a \sum x_i y_i + b \sum y_i^2 + d \sum y_i - P_n c y_n / k S + c \sum (h_i y_i / 2) &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

где: n – количество заготовок на станке.

Система (12) из трех уравнений имеет четыре неизвестные величины a, b, c, d ; для раскрытия статической неопределенности используем уравнение перемещения:

$$P_n / n S = k \delta_n,$$

где: $\delta_n = h_i^* / 2 - \xi_n$ – сближение полировальника (верхнего или нижнего) с заготовками вдоль линии действия силы P_n ;

h_i^* – толщина пластины, находящейся на линии действия силы P_n или ближайшей к этой линии.

ξ_n – величина, характеризующая взаимное расположение полировальников около линии действия силы P_n (рис. 2).

Окончательно система (12) примет вид:

$$\left. \begin{aligned} a \sum x_i + b \sum y_i + d n - P_n c / k S + c \sum (h_i / 2) &= 0; \\ a \sum x_i^2 + b \sum x_i y_i + d \sum x_i - P_n c x_n / k S + c \sum (h_i x_i / 2) &= 0; \\ a \sum x_i y_i + b \sum y_i^2 + d \sum y_i - P_n c y_n / k S + c \sum (h_i y_i / 2) &= 0; \\ n k S (a x_n + b y_n + d) / c - P_n + n k S h_i^* / 2 &= 0. \end{aligned} \right\} (13)$$

Решая систему из четырех уравнений относительно четырех неизвестных a, b, c, d по формуле (10), определим силу, действующую на любую заготовку при двустороннем полировании.

Приведенные методики расчета позволяют определить технологические параметры полирования: время обработки при известных погрешностях заготовок и заданной точности подложек, рассчитать оптимальное расположение заготовок в сепараторе, определить, необходима ли селекция заготовок по толщине, сравнить различные типы существующих станков по производительности и точности обработки. Кроме этого, можно рассчитать конструктивные элементы новых полировальных станков, параметры новых технологических процессов изготовления подложек интегральных микросхем.

Рабочая нагрузка P_n , входящая в систему уравнений (13), на серийных полировальных станках может изменяться в процессе полирования. Обычно технология строится таким образом, чтобы в начале полирования нагрузка P_1 (рис. 3) была минимальна и не разрушала хрупкие непрочные заготовки подложек. По мере «приработки» заготовок и полировальников вероятность разрушения снижается, что позволяет увеличивать нагрузку до рабочей P_2 для обеспечения требуемой производительности обработки. В конце полирования часто выполняют «выхаживание», - то есть обработку со сниженной величиной нагрузки P_3 для уменьшения глубины нарушенного слоя поверхности подложек.

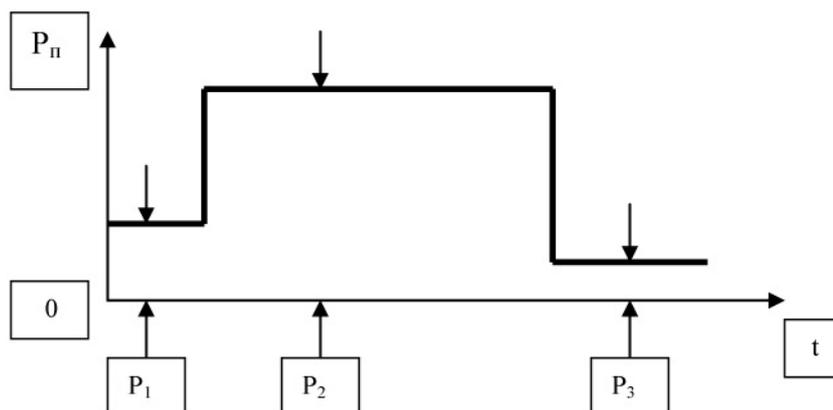


Рис. 3. Изменение рабочей нагрузки P_n в процессе полирования

Рабочая нагрузка P_n определяет силу P_i , действующую на i – ю заготовку, как показано ранее. В свою очередь сила P_i определяет эпюру контактного давления $p(x,y)$, действующего на обрабатываемую поверхность заготовки со стороны полировальников в текущей точке с координатами (x,y) в системе координат Oxy , связанной с заготовкой. В первом приближении влияние силы P_i на контактное давление $p(x,y)$ описывается неоднородным линейным дифференциальным уравнением:

$$\frac{d p(x,y,t)}{dt} + \frac{p(x,y,t)}{T} = \frac{P_i(t)}{T \pi R^2} + \frac{1}{\pi R^2} \cdot \frac{d P_i(t)}{dt}, \quad (14)$$

где: $p(x,y,t)$ – контактное давление на обрабатываемую поверхность заготовки в точке с координатами (x,y) в момент времени t ;

$P_i(t)$ – закон изменения во времени силы, действующей на i – ю заготовку;

R – радиус контура заготовки (для круглых подложек).

Это уравнение имеет общее решение

$$p(x,y,t) = C \exp(-t/T) + \exp(-t/T) \int f(P_i) \exp(t/T) dt, \quad (15)$$

где C – постоянная интегрирования, которая определяется из начального условия:

$$p(x,y,t) \Big|_{t=0} = p(x,y,0); \quad (16)$$

$f(P_i)$ – правая часть уравнения (14).

В условии (16) $p(x,y,0)$ – эпюра давлений на заготовку в начальный момент времени $t = 0$, которая зависит от рабочей нагрузки P_n , силы P_i , упругих характеристик полировальника и формы заготовки (может быть рассчитана известными в теории упругости методами [2]).

Окончательно решение (15) примет вид

$$p(x,y,t) = \{p(x,y,0) - [\int f(P_i) \exp(t/T) dt]_{t=0} + \int f(P_i) \exp(t/T) dt\} \exp(-t/T), \quad (17)$$

Выражением (17) учитывается закон изменения силы $P_i(t)$ от времени, а, следовательно, влияние нагрузки P_n на эпюру контактного давления $p(x,y,t)$ в любой точке (x,y) обрабатываемой поверхности заготовки в любой момент времени t в процессе двустороннего полирования, что можно использовать в частности при разработке новых технологических процессов и нового оборудования.

Приведенные методики расчета технологических параметров полирования позволили разработать ряд конструкций технологического оборудования. Часть разработок использована рядом предприятий и фирм.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Проников А.С. Надежность машин. – М.: Машиностроение, 1978. 592 с.
2. Тимошенко С.П., Гудьер Д. Теория упругости. Изд.2-е. М.: Наука, 1979. 560 с.