

ботки программой MathCAD. На рисунке 5 видны всплески температуры в точках кернения поверхности исследуемого стального листа толщиной 1 мм.

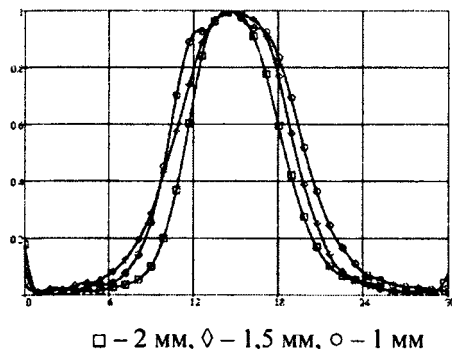


Рисунок 3 – Нормированные характеристики распределения температур для стали различной толщины

Проведенные исследования показали, возможность применения цифровой фотографии в задачах температурных измерений. Дальнейшие исследования могут быть направлены на расширение диапазона температур в область низких температур, ближе к спектру ИК излучения, в котором возможно применение другого класса матриц, воспринимающих ИК излучение. Необходимо произвести оценку метрологических характеристик цифрового фотоаппарата, то есть градуировку шкалы значений яркости объекта в значениях температуры объекта, изучить влияние качества поверхности и её предварительной обработки, влияние промежуточной среды находящейся между объектом исследования и цифровым фотоаппаратом, а также влияние выдержки и диафрагмы фотоаппарата на параметры кривых распределений значений яркостной температуры.

УДК 531.45:539.622

ОБ ИЗМЕРЕНИИ КОЭФФИЦИЕНТА ПОТЕРЬ И КОЭФФИЦИЕНТА ТРЕНИЯ КАЧЕНИЯ ПРИ МАЛЫХ КАЧАНИЯХ ФИЗИЧЕСКОГО МАЯТНИКА

Джилавдари И.З., Ризноокая Н.Н.

Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь

В связи с развитием микромеханики, измерения трения на малых участках поверхности приобретает большое значение, поскольку свойства поверхности рабочих элементов играют определяющую роль в работе этих приборов [1]. Однако исследованиям трения качения уделяется мало внимания, ввиду слабости эффектов и сложности явления.

В общем случае коэффициент трения качения f_k шарика с радиусом R определяется исходя из равенства

$$M = f_k N R, \quad (1)$$

где M – момент сил трения, N – нагрузка.

В настоящее время измерения коэффициента f_k проводят маятниковым методом [2]. Он основан на измерении амплитуд свободных затухающих колебаний физического маятника, который опирается на исследуемую поверхность двумя шариками. В этом

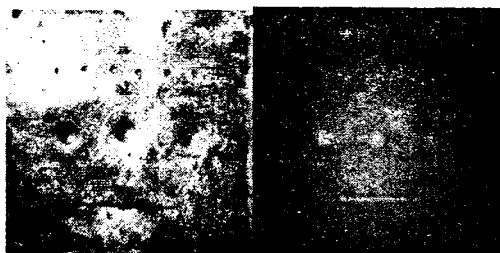


Рисунок 4 – Фотография пластины с дефектами и ее изображение в нагретом состоянии

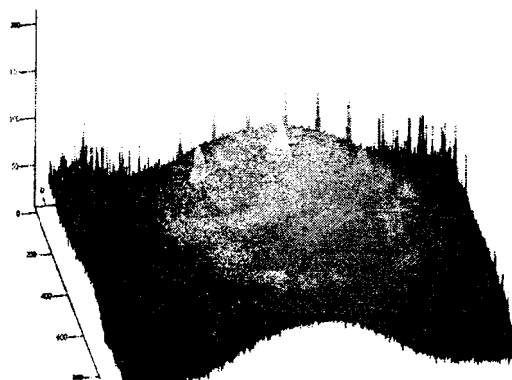


Рисунок 5 – Изображение дефектных зон после обработки с помощью программы MathCAD

1. Поскачей, А.А. Оптико-электронные системы измерения температуры / А.А. Поскачей, Е.П. Чубаров. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 248 с.
2. Гурский, Д.А. Вычисления в MathCAD12/ Д.А. Гурский, Е.С. Турбина. – СПб.: Питер, 2006. – 544 с.

методе измеряют начальную α_0 и конечную α_n амплитуды, а также число колебаний n , совершаемых маятником, и коэффициент трения качения рассчитывают по формуле

$$f_k = \frac{\cos \alpha_n - \cos \alpha_0}{2n(\alpha_0 + \alpha_n)}. \quad (2)$$

Формула (2) справедлива при условии линейного закона убывания амплитуды со временем. При больших амплитудах колебаний этот закон, примерно, выполняется. Данным методом измеряют значения f_k в интервале от 10^{-2} до 10^{-5} .

Экспериментально нами было установлено, что при малых амплитудах колебаний маятника значения коэффициента трения качения, могут быть меньше 10^{-6} . При этом затухание амплитуды происходит по нелинейному закону (рисунок 1). Поэтому

возникла проблема разработки более точного метода измерения коэффициента трения качения при произвольном законе затухания амплитуды.

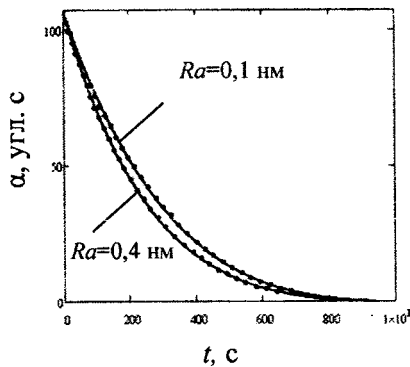


Рисунок 1

Нами было показано, что при малых амплитудах колебаний α зависимость момента трения качения от угла отклонения маятника можно описать формулой

$$M = -mgR(c + b|\varphi|^p) \text{sign}(\varphi). \quad (3)$$

Значения коэффициентов c , b и p находят методом аппроксимации из измеренной зависимости $\alpha(t)$.

В соответствии с (3), в процессе качаний маятника момент трения изменяется от максимального до минимального значений в пределах каждого цикла колебаний как показано на рисунке 2. Так же меняется и коэффициент f_k .

Поэтому удобнее пользоваться коэффициентом потерь энергии маятника за определенное число циклов колебаний.

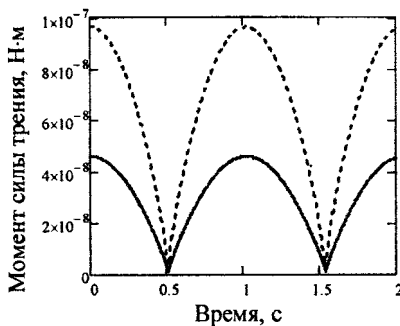


Рисунок 2

Для этого измеряют не две, а все амплитуды колебаний, и вычисление коэффициента потерь проводят по формуле [3]

$$f = \frac{A_{mp}}{mgR\Phi} = \frac{l \cos \alpha_n - \cos \alpha_0}{R \Phi}, \quad (4)$$

где A_{mp} – работа силы трения, Φ – полный угол, заметаемый маятником за время измерения, l – расстояние от точки касания шарика до центра масс маятника. Формула (2) следует из формулы (4) при

условии $A_{mp} = M_{mp}\Phi$.

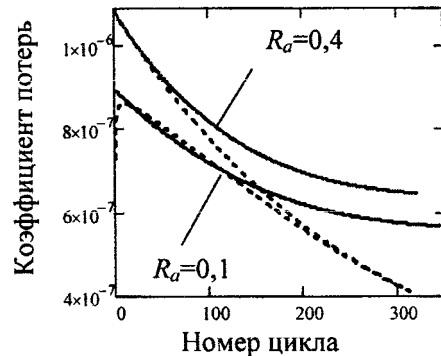


Рисунок 3

Были проведены измерения на кремниевых пластинах различной степени полировки, используемые при производстве интегральных микросхем, пластина 1 имела $R_a = 0,4$ нм; пластина 2 – $R_a = 0,1$ нм. Расчет по формуле (4) ($\alpha_0 = 100$ угл.с, $\alpha_n = 3$ угл.с) дает для пластины 1 значение $f = 6,47 \cdot 10^{-7}$ и для пластины 2 – $f = 5,68 \cdot 10^{-7}$.

На рисунке 3 показана зависимость f_k от числа колебаний, рассчитанная по формуле (4) (сплошные кривые) и по формуле (2) (пунктирные кривые). Формулу (4) можно применять практически для любых законов затухания амплитуды.

Заключение. Коэффициенты трения качения на поверхности кремниевых пластин, используемых при производстве интегральных схем и элементов микромеханических систем, могут быть меньше 10^{-6} .

Как следует из рис. 3, расчет коэффициента f_k по стандартной методике (формула (2)) дает заниженное значение, примерно, в 1,5 раза. Предложенная методика позволяет измерять малые коэффициенты трения с высокой точностью.

1. Дубравин, А.М. Локальная трибometрия на основе сканирующего зондового микроскопа/ А.М. Дубравин, О.Ю. Комков, Н.К. Мышкин. // Трение и износ. – 2005. – т.26, №3. – С. 269–277.
2. Материалы конструкционные и смазочные. Методы экспериментальной оценки коэффициента трения: ГОСТ 27640-88. – М.: Госкомитет по стандартам, 1988. – 20 с.
3. Джилавдари, И.З. Особенности динамики малых качаний маятника на упругой поверхности при наличии гистерезисного трения/ И.З. Джилавдари, Н.Н. Ризнооккая// Трение и износ. – 2007. – т.28, № 2. – С. 143 – 150.