

**МАТЕРИАЛЫ**

УДК 620.178.152.55

**ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ  
ПОВЕРХНОСТИ КРИСТАЛЛИЧЕСКОГО КРЕМНИЯ  
МАЯТНИКОВЫМ МЕТОДОМ**

И.З. ДЖИЛАВДАРИ, В.А. ЕМЕЛЬЯНОВ, В.А. ПИЛИПЕНКО, Т.В. ПЕТЛИЦКАЯ

*Белорусский национальный технический университет  
пр. Независимости 62, Минск, 220013, Беларусь**Государственный центр "Белмикрoанализ" научно-производственного объединения "Интеграл"  
ул. Корженевского 12, Минск, 220064, Беларусь**Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
П. Бровки, 6, Минск, 220013, Беларусь**Поступила в редакцию 3 мая 2005*

Предложен неразрушающий метод исследования физико-механических свойств поверхности материалов, основанный на экспериментальном и теоретическом анализе характера затухания свободных колебаний физического маятника с опорой качения. Вводятся безразмерные параметры, описывающие состояние поверхности. Даются оценки состояния поверхностей кремниевых пластин с ориентацией  $\langle 100 \rangle$  и  $\langle 111 \rangle$ .

*Ключевые слова:* состояние поверхности, физико-механические параметры, маятниковый метод исследования, трение качения.

**Введение**

Одним из способов исследования физико-механических свойств полупроводниковых материалов является измерение микротвердости, которая представляет собой чувствительную характеристику структурного состояния поверхности материала, характера и прочности химических связей [1]. Недостаток этого метода состоит в том, что здесь о состоянии поверхности судят по результатам ее разрушения.

В связи с этим представляет особый интерес разработка неразрушающего метода исследования поверхности материала, чувствительного к структурному состоянию этой поверхности. Информацию о физико-механических свойствах поверхности материала может дать исследование трения качения, которое связано с упругим гистерезисом и модулем Юнга [2–4].

**Методика и теория**

Физический маятник, совершающий свободные колебания, в котором два шарика, опираются на плоскую поверхность исследуемого тела, представляет собой уникальный измерительный прибор, отличающийся высокой чувствительностью к состоянию поверхности. Это свойство используют, в частности, для оценки твердости лакокрасочных материалов [5], где измеряют время колебаний маятника, а также для оценки коэффициента трения качения и ко-

эффицента гистерезисных потерь [6], где измеряют изменение амплитуды колебаний за заданное число колебаний. Однако в обоих случаях удастся получить лишь усредненные и в определенном смысле грубые характеристики состояния поверхности материала, поскольку здесь не удастся установить зависимость сил трения от скорости качения шариков и разделить механизмы диссипации энергии [7].

Покажем, что маятниковый метод можно сделать более тонким инструментом для исследований состояния поверхности материалов, если установить зависимость силы трения от скорости. В [8] было показано, что если предположить, что момент силы трения качения зависит от угловой  $\Omega$  скорости качения шара по закону

$$M_{mp} = -mgR_u (b_0 + b_1|\Omega| + b_2\Omega^2) \text{sign}(\Omega), \quad (1)$$

где  $m$  — масса маятника,  $R_u$  — радиус шарика,  $b_i$  — постоянные коэффициенты, которые условно можно рассматривать как коэффициенты трения качения, то закон затухания амплитуды колебаний маятника будет описываться формулой

$$\alpha(t) = \beta(t)\cos(\omega t + \varphi), \quad (2)$$

где  $\omega \approx \sqrt{\frac{mgl_c}{I}}$ ;  $I$  — момент инерции маятника относительно точки касания шарика и поверхности материала;  $l_c$  — расстояние от центра масс маятника до центра шарика. При этом вид зависимости от времени амплитуды колебаний  $\beta(t)$  дается формулой:

$$\beta(t) = \frac{\beta_0 - \frac{k_1\beta_0 + 2k_0}{\sqrt{-D}} \text{tg}\left(\frac{1}{2}\sqrt{-D}t\right)}{1 + \frac{k_1 + 2k_2\beta_0}{\sqrt{-D}} \text{tg}\left(\frac{1}{2}\sqrt{-D}t\right)}, \quad (3)$$

где  $D = k_1^2 - 4k_0k_2 < 0$ ;  $\beta_0$  — начальная амплитуда, причем  $k_0 = \frac{4R}{Tl_c}b_0$ ,  $k_1 = \frac{2\pi^2 R_u}{T^2 l_c}b_1$ ,

$k_2 = \frac{32\pi^3 R_u}{T^3 l_c}b_2$ ;  $R_u$  — радиус шарика;  $T$  — период колебаний.

Если  $D > 0$ , то формула принимает другой вид:

$$\beta(t) = \frac{(\sqrt{D} - k_1)\beta_0 - 2k_0 + [(\sqrt{D} + k_1)\beta_0 + 2k_0] \exp(-\sqrt{D}t)}{\sqrt{D} + k_1 + 2k_2\beta_0 + (\sqrt{D} - k_1 - 2k_2\beta_0) \exp(-\sqrt{D}t)}, \quad (4)$$

Измерив на опыте значения амплитуд и соответствующие им моменты времени, можно методом нелинейной аппроксимации вычислить значения постоянных  $k_i$  и  $b_i$  и установить зависимость момента силы  $M_{mp}$  от угловой скорости вращения шарика. Далее из этих постоянных можно сформировать количественные критерии состояния поверхности материалов и провести их сравнительный анализ. Это позволит в дальнейшем построить физическую картину рассеяния энергии в приповерхностном слое, исходя из микроструктуры материала.

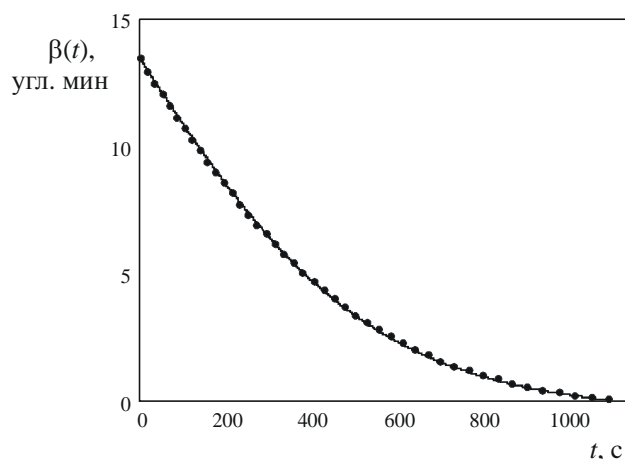
### Экспериментальная часть

В ходе экспериментов наблюдались свободные затухающие колебания физического маятника массой 1,276 кг, опиравшегося двумя шариками диаметром 10 мм на исследуемые плоские полированные пластины толщиной 0,4 мм, выполненные из кремния. Шарика были выполнены из прессованного корунда ( $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ ), имели модуль Юнга 310 ГПа и коэффициент Пуассона 0,27. Последовательно измерялись значения амплитуд колебаний маятника через каждые десять периодов и время соответствующих десяти периодов колебаний. Измерения прово-

дились в диапазоне изменения амплитуды колебаний, примерно, от 13 до 0,13 угловых минут. Столь малые амплитуды колебаний позволяли свести к минимуму проскальзывание шариков на поверхности исследуемых материалов в процессе качений.

### Результаты и их обсуждение

На рисунке приведены амплитуды  $\beta(t)$  колебаний маятника, полученные нелинейной аппроксимацией экспериментальных точек по формулам (3) и (4) для пластин Si <111> и для пластин Si <100>, усредненные по пяти опытам для каждого образца. Относительные средние квадратические погрешности аппроксимаций не превышали соответственно 0,58 и 0,48%. Значения коэффициентов трения качения  $b_1$  даны в таблице в столбцах 2–4. Коэффициенты потерь энергии в таблице даны в столбцах 5 и 6. Максимальная мощность потерь дает максимальную убыль энергии маятника в единицу времени в пределах первого периода колебаний.



Результаты аппроксимации экспериментальных зависимостей амплитуды свободных колебаний маятника от времени для Si <111> — отдельные точки и Si <100> — сплошная линия

Зависимости  $\beta(t)$  для исследуемых материалов в данной серии опытов на рисунке оказались практически неразличимы. Поэтому при анализе этих кривых стандартными методами [5, 6] нельзя сделать какие-либо выводы о наличии и характере различия состояний поверхностей Si <111> и Si <100>. Однако, исходя из полученных значений коэффициентов  $b_i$ , можно ввести дополнительные как размерные, так и безразмерные параметры, определяющие состояние поверхности исследуемых материалов. Безразмерный критерий приведен в таблице (столбец 7). Данный безразмерный параметр был выбран из интуитивного соображения: чем лучше поверхность, тем меньше коэффициенты  $b_i$  и тем больше полное время  $t_{кол}$  или средний период  $T_{ср}$  колебаний.

Видно, что значения данного критерия для обоих образцов существенно отличаются между собой. Он оказывается более чувствительными к состоянию поверхности, чем другие критерии. Связь этого критерия со структурой материалов требует дополнительных теоретических исследований.

### Заключение

Полученные результаты свидетельствуют о том, что маятниковый метод исследования состояния поверхности материалов является более тонким инструментом, чем это представлялось ранее. Он позволяет ввести новые параметры, характеризующие состояние поверхности. В отличие от такого известного параметра как твердость, который не является физическим [9],

а скорее, технологическим параметром, эти параметры являются вполне физическими. Их измерение не приводит к разрушению поверхности.

Кроме того, маятниковый метод позволяет проводить неразрушающие исследования состояния поверхности весьма тонких и хрупких покрытий. В проведенных опытах радиус статического пятна контакта шарика и исследуемых образцов составлял, примерно, 60 мкм, а глубина упругой деформации пластин — 0,6 мкм. Эти размеры можно регулировать, меняя вес маятника и радиус шариков.

**Таблица значений параметров состояния поверхности кремниевых пластин**

Образец	Параметры состояния поверхности					
	коэффициенты трения качения			параметры потерь энергии		безразмерный параметр
	$b_0, 10^{-7}$	$b_1, 10^{-4} \text{ с}$	$b_2, 10^{-2} \text{ с}^2$	максимальная мощность потерь, $10^{-9} \text{ Дж/с}$	средний коэффициент потерь за первый период, $10^{-3}$	$\frac{b_0 b_1 b_2}{T_{ch}^3}, 10^{-13}$
1	2	3	4	5	6	7
Si <111>	3,01	5,9	-0,02	3,51	7,33	5,74
Si <100>	2,82	6,23	-0,03	3,24	7,67	6,91
относительная разница				7,7%	4,5%	20%

## RESEARCHES OF A PHYSIC MECHANICAL STATE OF A SURFACE OF CRYSTAL SILICON

I.Z. GILAVDARY, V.A. EMEL'YANOV, V.A. PILIPENKO, T.V. PETLITSKAYA

### Abstract

Not destructive method for research of physic mechanical properties of a surface of the materials is offered. This method is based on the experimental and theoretical analysis of character of attenuation of free oscillations of a physical pendulum with a ball support. The dimensionless parameters describing a condition of a surface are entered. Estimations of a state of surfaces of silicon plates with orientation <100> and <111> are given.

### Литература

1. Концевой Ю.А., Литвинов Ю.М., Фаттахов Э.А. Пластичность и прочность полупроводниковых материалов и структур. М., 1982. 240 с.
2. Физический энциклопедический словарь. Т. 1. М., 1960.
3. Джонсон К. Механика контактного взаимодействия. М., 1989. 510 с.
4. Боуден Ф.П., Тейлор Д. Трение и смазка твердых тел. М., 1968. 543 с.
5. ГОСТ 5233-89. Материалы лакокрасочные. Метод определения твердости покрытий по маятниковому прибору.
6. ГОСТ 23.214-83. Обеспечение износостойкости изделий. Маятниковый метод измерения коэффициента трения качения.
7. Савенко В.И. и др. Применение маятникового метода для анализа механизмов поглощения энергии при качении // Трение и износ. 1988. Т. 9, № 2. С. 212-222.
8. Джилавдари И.З., Русак А.А. Измерение сил трения методом аппроксимации огибающей // Трение и износ. 2000. Т. 21, № 5. С. 424-432.
9. Григорович В.К. Твердость и микротвердость металлов. М., 1976. 230 с.