

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 539.211.001.5

**ОЦЕНКА УПРУГОГО НАТЯЖЕНИЯ
ПОВЕРХНОСТИ МАТЕРИАЛОВ МАЯТНИКОВЫМ МЕТОДОМ**

И.З. ДЖИЛАВДАРИ, В.А. ПИЛИПЕНКО, Е.Ю. КАКОШКО, Т.В. ПЕТЛИЦКАЯ

*Белорусский национальный технический университет
пр. Независимости, 62, Минск, 220064, Беларусь**Поступила в редакцию 23 августа 2006*

Предложен новый неразрушающий метод оценки коэффициента поверхностного натяжения материалов, основанный на измерении зависимости периода свободных колебаний физического маятника, опирающегося двумя шариками на исследуемую поверхность, от амплитуды колебаний. Данный метод использован при оценке упругости поверхности кремния с ориентацией <100>.

Ключевые слова: измерение упругости, маятниковый метод исследования, упругость поверхности.

Введение

Общая тенденция к миниатюризации полупроводниковых приборов требует проведения фундаментальных исследований поверхностных свойств полупроводниковых материалов. В ряде случаев геометрические размеры рабочих элементов таковы, что структура поверхности играет определяющую роль в работе этих приборов [1]. Большой интерес представляет упругость поверхности материалов при натяжении, поскольку она непосредственно связана со структурой поверхности. Однако измерение поверхностной энергии или коэффициента поверхностного натяжения твердых материалов является нерешенной до сих пор проблемой.

Известны всего несколько методов измерения коэффициента поверхностного натяжения твердых материалов. Метод измерения поверхностной энергии при медленном расщеплении тела типа слюды или развития трещины в стекле [2, 3] является разрушающим, обладает слишком высокой погрешностью и его трудно использовать на практике для надежных измерений.

В методе нулевой ползучести образец в виде фольги или проволоки нагревают до температуры, близкой к температуре плавления [2, 3]. В этом состоянии образец начинает сокращаться, стараясь уменьшить свою поверхность, подобно жидкости. В данном методе на образец воздействуют силой, удерживающей его от сокращения, путем подвешивания груза. При этом изменяют вес груза и измеряют скорость деформации. Далее методом графической интерполяции устанавливают значение веса груза, при котором деформация образца будет отсутствовать. Считают, что в этом случае вес груза равен силе поверхностного натяжения материала. Названный метод имеет большую погрешность, поскольку при таких температурах структура и свойства материала существенно меняются.

Метод измерения поверхностного натяжения на границе между проводящим телом и электролитом [4] можно применять только к проводящим телам. Кроме того, в этом методе из-

меряют не сам коэффициент поверхностного натяжения, а так называемый эстанс, т.е. производную поверхностного натяжения по электрической переменной, из которой трудно найти коэффициент поверхностного натяжения свободной поверхности металла.

Физический маятник, который опирается двумя шариками на плоскую поверхность, представляет собой уникальный измерительный прибор, отличающийся высокой чувствительностью к состоянию поверхности. Взаимодействие шариков с исследуемой поверхностью здесь ограничено лишь размерами области контакта. Свободные затухающие колебания указанного маятника используют для измерения трения качения [5, 6].

Особенностью динамики колебаний физического маятника с опорой в виде двух шариков, которая была обнаружена недавно, является резкое уменьшение периода колебаний при стремлении амплитуды колебаний к нулю [7]. Объяснить такое поведение влиянием трения не удастся, поскольку период свободных колебаний очень слабо зависит от трения в опоре. При этом трение, как правило, приводит к увеличению периода колебаний [7,8]. Объяснением указанной особенности в поведении периода может быть упругое натяжение поверхности материала шариками в области контакта, которое влияет на период колебаний маятника.

Экспериментальная часть

В наших экспериментах наблюдались свободные затухающие колебания физического маятника массой $m=1,158$ кг, опиравшегося двумя шариками диаметром 10 мм на два одинаковых исследуемых образца. Шарика из прессованного корундового порошка имели модуль Юнга 310 ГПа, коэффициент Пуассона 0,27 и располагались на расстоянии 10 см друг от друга. Центр тяжести маятника находился вблизи мгновенной оси вращения. Исследуемыми образцами служили полированные поверхности пластин толщиной 0,4 мм из монокристаллов кремния с плоскостями (100) с легирующими добавками ЭКС 0,01. Пластины крепились к стальному основанию.

Модуль Юнга кремния в направлении $\langle 100 \rangle$ — $E_{\langle 100 \rangle} \approx 130$ ГПа [9]. Формулы Герца [10] дают для обоих образцов примерно следующие значения параметров области статического контакта шариков и пластин: диаметр области контакта 0,14 мм; сближение 1 мкм; контактный угол 96 угл. мин.

Были проведены 4 измерения при начальной амплитуде маятника 2,7 угл. мин. Следовательно, максимальная амплитуда колебаний шариков на поверхности кристалла была примерно в 35 раз меньше диаметра области контакта.

Измерялись значения амплитуд через каждые 10 периодов и время соответствующих десяти периодов колебаний.

Теория метода

В [11] в виде дифференциального уравнения приведено решение задачи о колебаниях маятника, в которой шарика радиусом $R_{ш}$ опираются на недеформируемую сферическую вогнутую поверхность радиусом R . Из него следует, что в области очень малых амплитуд зависимость периода T от амплитуды φ может иметь вид, близкий к наблюдавшемуся на опыте, если предположить, что радиус R зависит от амплитуды. В этом случае зависимость $T(\varphi)$ будет описываться формулой

$$T(\varphi) = T_0 \left[\frac{r(\varphi) - 1}{r(\varphi)} \right]^{0.5}, \quad (1)$$

где $r(\varphi) = R(\varphi)/R_{ш}$; T_0 — период колебаний при $R = \infty$, т.е. период колебаний на плоской недеформируемой поверхности. Численный анализ этого уравнения показал, что в качестве зависимости $R(\varphi)$ можно взять функцию

$$r(\varphi) = p(1 + a\varphi^b), \quad (2)$$

где $p=r(0)$; a и b — постоянные параметры, которые могут быть определены методом нелинейной аппроксимации. Уравнения (1) и (2) были взяты в качестве математической модели, описывающей взаимодействие шариков и поверхности пластин. Они будут использованы в качестве уравнений регрессии при дальнейшем численном анализе.

Поскольку $T(0) < T_0$, взаимодействие шариков с поверхностью кристалла обеспечивает маятнику в области $\varphi \approx 0$ дополнительную кинетическую энергию

$$\Delta W = \frac{mgR_{\text{ш}}\varphi^2}{2} (T_0^2 - T^2(0)) / T^2(0). \quad (3)$$

В условиях опыта амплитуда свободных колебаний маятника была существенно меньше угла статического контакта шарика и опоры. Поэтому в качестве наглядной физической модели взаимодействия представим, что каждый шарик катается по слабо надутому матрацу, лежащему на жестком основании. Масса маятника при этом компенсируется реакцией полубесконечного упругого основания. В этом случае, совершая малые колебания, шарик натягивает верхний слой матраца поочередно с каждой стороны. Отсюда следует, что взаимодействие шариков с поверхностью сводится к натяжению верхних слоев кристалла.

Будем считать, что в пределе малых амплитуд область взаимодействия шарика и поверхности ограничена радиусом $R(0) \equiv R_0$. Введем коэффициент поверхностного натяжения γ и будем считать, что сила взаимодействия шарика и поверхности пропорциональна величине $\gamma R_0 \varphi$. Приравнявая запасенную на площади πR_0^2 потенциальную энергию поверхностного натяжения $\gamma R_0^2 \varphi^2$ величине ΔW и учитывая, что в маятнике имеются два шарика, из формул (1) – (3) найдем

$$\gamma \approx \frac{mg}{4\pi R_{\text{ш}}} \frac{1}{p^2(p-1)}. \quad (4)$$

Результаты опытов и расчетов и их обсуждение

На рис. 1 представлены результаты измерений интервалов времени во всех четырех опытах в зависимости от порядкового номера измерения.

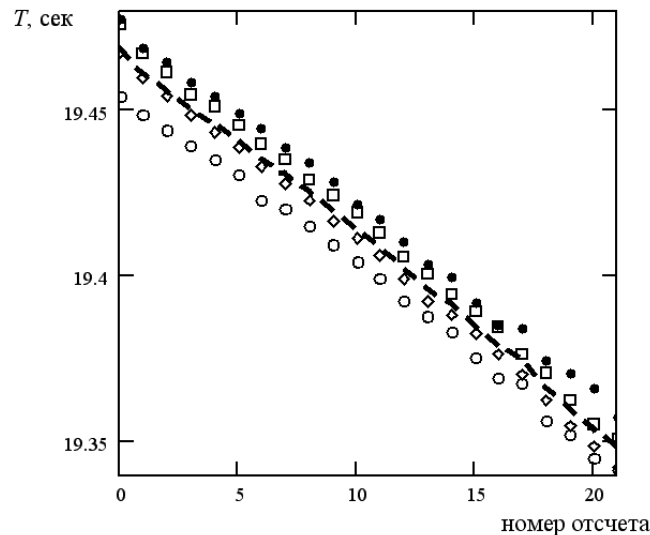


Рис. 1. Зависимость длительности циклов из десяти периодов колебаний от номера отсчета. Черные точки — первый опыт, ромбики — второй, кружки — третий, квадраты — четвертый. Пунктирная линия — среднее значение

Здесь обращает на себя внимание практически линейное убывание периода в зависимости от его номера. Выяснение причин такого поведения требует отдельного исследования.

На рис. 2 показана в виде отдельных точек зависимость этих интервалов от амплитуд, усредненная по всем этим опытам.

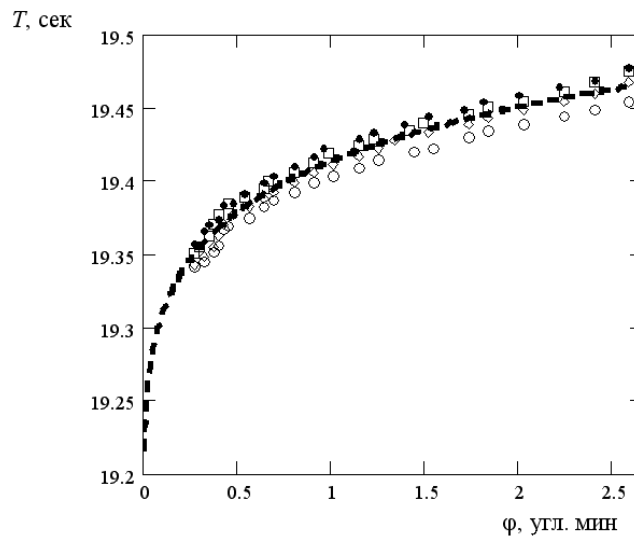


Рис. 2. Зависимость длительности циклов из десяти периодов колебаний, представленных на рис. 1, от амплитуды. Пунктирная линия — результат аппроксимации среднего значения

Сплошной линией показан результат аппроксимации этой зависимости с помощью уравнений (1)–(2). Были получены следующие значения параметров аппроксимации: $T_0=2,078$ с; $a=1,09$; $b=0,15$; $p=5,91$. Из (4) найдем, что $\gamma \approx 1,05$ Н/м. Погрешность аппроксимации составила 0,01 %.

Найденное значение γ существенно зависит от закона экстраполяции экспериментальных точек на рис. 2 к значению $\varphi=0$, т.е. от выбора вида уравнения регрессии типа (1) или (2). Очевидно, что такая экстраполяция неоднозначна. Она существенно зависит от механизма, объясняющего экспериментальную зависимость $T(\varphi)$. Более того, даже в рамках выбранных уравнений регрессии возникает проблема оценки значения γ , поскольку результаты нелинейной аппроксимации существенно зависят от выбора исходных значений параметров регрессии.

Поэтому представленная здесь модель взаимодействия шариков и поверхности кремния и полученные результаты следует рассматривать лишь как первое приближение, используемое для объяснения полученных экспериментальных результатов.

Заключение

Из результатов опыта и из расчетов можно считать установленным, что минимальный период $T(0) \neq 0$, а радиус R_0 превосходит радиус шарика $R_{ш}$. Поэтому даже в пределе $\varphi=0$ условия колебаний шарика на упругой поверхности не могут быть сведены к условиям задачи статического контакта. В последнем случае мы бы имели $R_0=R_{ш}$ и $T(0) = 0$. С другой стороны, поскольку смещения шариков в процессе колебаний маятника были гораздо меньше диаметра области статического контакта, можно предположить, что деформация поверхности кристалла связана, в основном, с натяжением (растяжением) верхних слоев кристалла.

Представленные исследования могут стать основой нового метода исследования физико-механических свойств поверхности материалов. Достоинствами данного метода являются его универсальный и неразрушающий характер, простота и локальность. Он позволяет проводить исследования тонких и хрупких покрытий.

ABOUT AN ESTIMATION OF ELASTICITY OF A SURFACE OF MATERIALS BY A PENDULUM METHOD

I.Z. GILAVDARY, V.A. PILIPENKO, T.V. PETLITSKAYA, E.Y. KAKOSHKO

Abstract

The new not destructive method of an estimation of elasticity of a surface of materials is offered. This method bases on measurements of dependence of the period of free oscillations of the physical pendulum from amplitude. The pendulum is supported on two balls which are rolling on a researched surface. The method is used for comparison of elasticity of surfaces of silicon plates with orientation <100>.

Литература

1. *Бехштедт Ф., Эндерлайн Р.* Поверхности и границы раздела полупроводников. М., 1990. 488 с.
2. *Миссол В.* Поверхностная энергия раздела фаз в металлах. М., 1978. 176 с.
3. Физический энциклопедический словарь. Т. 4, М., Сов. энциклопедия, 1965, 592 с.
4. *Гохштейн А.Я.* Поверхностное натяжение твердых тел и адсорбция. М., 1976. 400 с.
5. ГОСТ 23.214-83. Обеспечение износостойкости изделий. Маятниковый метод измерения коэффициента трения качения.
6. *Савенко В.И. и др.* // Трение и износ. 1988. Т. 9, № 2. С. 212–222.
7. *Джилавдари И.З.* // Трение и износ. 2003. Т. 24, № 1. С. 42–48.
8. *Боголюбов Н.Н., Митропольский Ю.А.* Асимптотические методы в теории нелинейных колебаний. М., 1974. 504 с.
9. *Концевой Ю.А., Литвинов Ю.М., Фаттахов Э.А.* Пластичность и прочность полупроводниковых материалов и структур. М., 1982. 240 с.
10. *Джонсон К.* Механика контактного взаимодействия. М., 1989. 510 с.
11. *Джилавдари И.З.* Проблемы динамики физического маятника с опорой качения. Материалы Международной научно-практической конференции "Метрологическое обеспечение качества 2000. Минск, 2000. С. 171–176.