

УДК 539.3+620.178.152.2

ИССЛЕДОВАНИЕ УПРУГИХ РАСТЯЖЕНИЙ И ДИССИПАЦИИ ЭНЕРГИИ НА ПОВЕРХНОСТИ КРИСТАЛЛА МЕТОДОМ МИКРОДЕФОРМАЦИЙ ПОД ДЕЙСТВИЕМ КАЧАЮЩЕГОСЯ ШАРИКА

И. З. Джилавдари, Е. Ю. Какошко

Белорусский национальный технический университет,
пр-т Независимости 65, г. Минск, Беларусь. E-mail: gilavdary@mail.by

Введение

По мере уменьшения размеров приборов состояние поверхностей их элементов оказывает все большее влияние на свойства этих приборов. Традиционные физико-механические параметры, такие как модуль Юнга и твердость, не могут отразить все разнообразие свойств поверхностей материалов. Модуль Юнга характеризует объемные свойства материалов. Оценка твердости, в принципе, является методом исследования, разрушающим поверхность. Современные приборостроение и технология нуждаются в разработке новых методов контроля свойств и качества поверхности материалов.

Другой параметр, характеризующий упругие свойства поверхности – поверхностное натяжение. Однако до сих пор коэффициент поверхностного натяжения следует считать, по существу, скрытым физическим параметром, поскольку надежные методы измерения этой величины отсутствуют. Используемый на практике метод нулевой ползучести позволяет проводить измерения лишь для тел, нагретых до температур, близких к температуре плавления [1].

Среди неразрушающих методов исследования процессов диссипации энергии на поверхности материалов можно назвать метод измерения трения качения с помощью физического маятника (с опорой на два шарика), совершающего свободные затухающие колебания [2]. Однако используемая до сих пор методика сводится к вычислению коэффициента трения, который получают в предположении, что сила трения качения не зависит от скорости. Это не позволяет установить зависимость трения качения от скорости и затрудняет возможность разделения механизмов поглощения энергии на поверхности.

В то же время маятник с опорой качения является прибором с уникальной чувствительностью к состоянию поверхности, на которую опирается маятник. В наших опытах замечено, что период колебаний такого маятника резко уменьшается при стремлении амплитуды колебаний к нулю. Этот эффект наблюдался на различных материалах, включая латунь, стекло, твердые сплавы и лейкосапфир [3]. Объяснить данный эффект влиянием трения не удастся. Трение, как правило, приводит к увеличению периода колебаний (пунктирная кривая на рис. 1).

Методика и результаты эксперимента

В описываемых в данном докладе экспериментах наблюдались свободные затухающие колебания физического маятника массой $m = 1,276$ кг, опиравшегося двумя шариками диаметром 10 мм на плоскую полированную поверхность монокристалла кремния с ориентацией $\{100\}$. Шарика из прессованного корундового порошка располагались на расстоянии 10 см друг от друга. Маятник совершал колебания вокруг горизонтальной оси, образованной линией, проходящей через точки контактов шариков и поверхности. Измерялись значения амплитуд и периодов колебаний этого маятника при начальной амплитуде 1,4 угл. мин и конечной контролируемой амплитуде 0,16 угл. мин. Максимальное смещение шариков не превышало 3 мкм, минимальное смещение составило 0,2 мкм. Результаты, усредненные по двум сериям измерений, представлены на рис. 1 и 2 в виде отдельных точек.

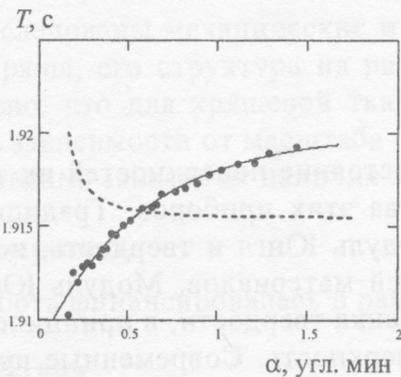


Рис. 1. Период колебаний маятника в зависимости от амплитуды

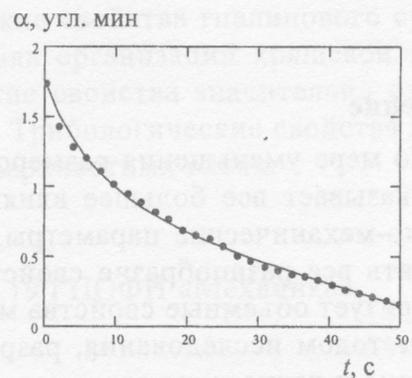


Рис. 2. Временная зависимость амплитуды колебаний маятника

Оценка упругих растяжений поверхности

Формулы Герца [4] дают примерно следующие значения параметров области упругого статического контакта шарика и поверхности однородного полубесконечного пространства, рассматриваемого в обычной теории упругости (рис. 3): диаметр пятна контакта $d \approx 120$ мкм; внедрение $\delta \approx 0,8$ мкм; контактный угол $\beta \approx 80$ угл. мин. Таким образом, смещения шариков в процессе колебаний маятника существенно меньше размеров пятна статического контакта.

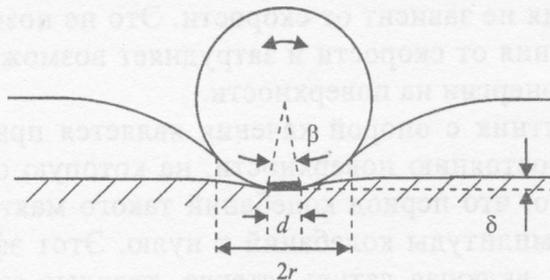


Рис. 3. Схема упругого статического контакта шарика и поверхности однородного полубесконечного пространства

Наблюдавшуюся зависимость между T и α , показанную в виде точек на рис. 1, по-видимому, можно объяснить упругим взаимодействием шариков и поверхности. Картина взаимодействия представлена на рис. 3. Слабые в механическом отношении верхние слои поверхности кристалла (известно, что их не более десяти), растягиваются и прогибаются под действием веса маятника. Поскольку смещение шариков очень мало и эффективная общая толщина верхних слоев также мала, движение шариков можно представить как их покачивание на жесткой поверхности между двумя пружинами, натянутыми горизонтально с силой $F = 2\gamma r$, где γ – коэффициент поверхностного растяжения, r – радиус окружности контакта шарика и верхних слоев поверхности. Формула, описывающая зависимость $T(\alpha)$, имеет вид

$$T(\alpha) = T_0 \frac{1}{\left[1 + 8 \frac{\gamma R}{P} a^{b\alpha}\right]^{1/2}}, \quad (1)$$

где P – вес маятника, R – радиус шарика; T_0 , a и b – параметры, определяемые, как и γ , методом наименьших квадратов. Результат аппроксимации экспериментальной зависимости формулой (1) показан на рис. 1 в виде сплошной линии. При этом получено значение $\gamma \approx 3,77 \text{ Н/м}$. Отметим, что для поверхности $\{111\}$ кремния методом нулевой ползучести получено значение $\gamma \approx 1,25 \text{ Н/м}$ [5].

При выводе формулы (1) предположено, что потенциальная энергия поверхностного растяжения зависит от угла поворота маятника: $W_\gamma = 4\gamma R^2 \alpha^2 a^{b|\alpha|}$. Зависимость W_γ от смещения шарика построена с учетом результатов аппроксимации (рис. 4).

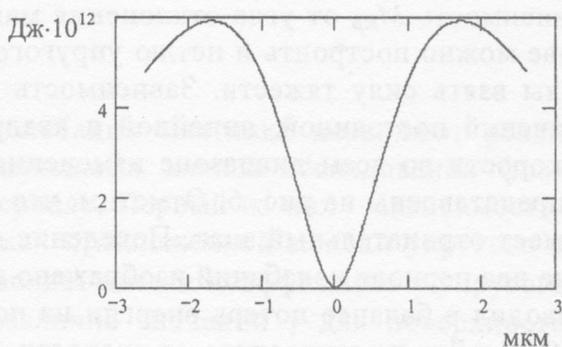


Рис. 4. Зависимость потенциальной энергии поверхностного растяжения W_γ от смещения шарика

Отметим, что в наших опытах при исследовании других образцов кристалла кремния было установлено, что значения γ зависят как от кристаллографической ориентации поверхности, так и от вида и концентрации легирующих примесей.

Исследование диссипации энергии на поверхности

Затухание амплитуды колебаний маятника показано на рис. 2. Нами был разработан метод, позволяющий описать затухание с высокой точностью. В этом ме-

тоде момент силы трения качения записывают в виде функции от угловой скорости:

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

где b_0 , b_1 и b_2 – постоянные коэффициенты, которые условно можно называть коэффициентами трения.

Удалось получить аналитический вид кривой затухания (см. ниже формулу (3)) [6], что позволило определить коэффициенты b_i методом наименьших квадратов. Результат аппроксимации показан на рис. 2 сплошной линией. Из полученных значений b_i и формулы (2) рассчитаны величины, характеризующие диссипацию энергии, такие как момент M_{mp} силы трения и мощность потерь:

$$\alpha(t) = \frac{(\sqrt{D} - k_1)\alpha_0 - 2k_0 + [(\sqrt{D} + k_1)\alpha_0 + 2k_0] \exp(-\sqrt{D}t)}{\sqrt{D} + k_1 + 2k_2\alpha_0 + (\sqrt{D} - k_1 - 2k_2\alpha_0) \exp(-\sqrt{D}t)}. \quad (3)$$

Здесь $D = k_1^2 - 4k_0k_2$ и α_0 – начальная амплитуда, причем в нашем случае

$$k_0 = \frac{4}{T} b_0, \quad k_1 = \frac{2\pi^2}{T^2} b_1, \quad k_2 = \frac{32\pi^3}{T^3} b_2.$$

Отметим, что пунктирная кривая на рис. 1 построена с учетом найденных таким образом значений b_i . Выражение, связывающее период колебаний с параметрами трения, в нашем случае имеет вид ($\omega = 2\pi/T$)

$$T = T_{cp} \left\{ 1 - \left[\frac{6b_0^2}{\pi^2\alpha_0^2} + \frac{3\omega R b_0 b_1}{2\pi\alpha_0} + \omega^2 R^2 \left(\frac{b_1^2}{8} + \frac{32b_0 b_2}{9\pi^2} \right) + \frac{\omega^3 R^3 b_1 b_2}{3\pi} \alpha_0 + \frac{0,164\omega^4 R^4 b_2^2}{\pi^2} \alpha_0^2 \right] \right\}^{-1}. \quad (4)$$

На рис. 5 показана зависимость M_{mp} от угла отклонения маятника за первые два периода. На этой основе можно построить и петлю упругого гистерезиса, если в качестве упругой силы взять силу тяжести. Зависимость M_{mp} (пунктирная кривая) и абсолютных значений постоянной, линейной и квадратичной его составляющих от угловой скорости во всем диапазоне изменения угловых скоростей колебаний маятника представлены на рис. 6. Отметим, что линейная составляющая в нашем случае имеет отрицательный знак. Поведение мощности потерь энергии маятника за первые два периода колебаний изображено на рис. 7.

Излагаемый метод позволил в балансе потерь энергии на поверхности выделить составляющую $W_0 = 0,37$ нДж, не зависящую от скорости, и составляющую $W_v = 1,7$ нДж, зависящую от скорости.

При качении (или качаниях) идеально твердого тела по недеформируемой поверхности потери энергии должны отсутствовать. Поэтому характеристиками качества поверхности могут быть полная максимальная мощность потерь или ее составляющие. Кроме того, из коэффициентов b_i могут быть построены безразмерные величины, характеризующие качество поверхности, как, например, $b_0 b_1 b_2 / T^3$ или $b_1 b_2 / T^3$.

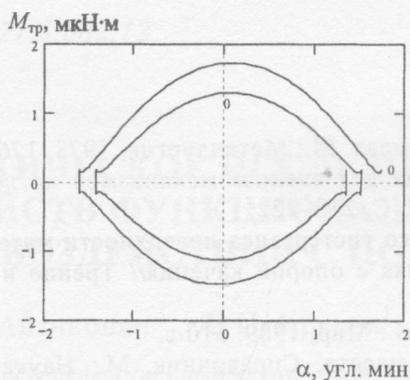


Рис. 5. Зависимость момента силы трения качения от угла отклонения маятника за первые два периода

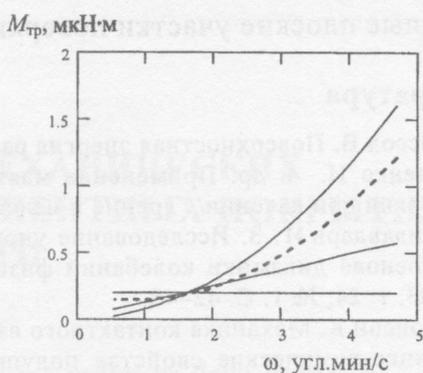


Рис. 6. Зависимость момента силы трения качения и абсолютных значений постоянной, линейной и квадратичной его составляющих от угловой скорости

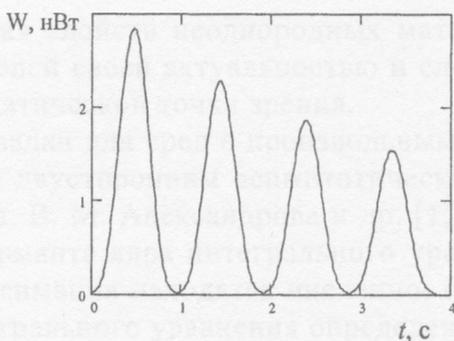


Рис. 7. Изменение мощности потерь энергии маятника за первые два периода колебаний

Выводы

Свободные колебания маятника позволяют реализовать одновременно два практически независимых канала исследования физико-механических свойств поверхности материала. Первый из них – зависимость периода колебаний от амплитуды – в рамках предложенной модели упругого взаимодействия шариков и поверхности позволяет ввести коэффициент γ упругого растяжения поверхности. Установленное различие значений γ для поверхностей кремния с различными ориентациями, а также зависимость γ от вида и концентрации примесей дает возможность использовать этот параметр для сравнительного анализа упругих свойств поверхностей твердых тел и тонких покрытий. Вполне возможно, что коэффициент γ как-то связан с коэффициентом поверхностного натяжения. Второй канал – зависимость амплитуды колебаний от времени – дает возможность рассчитать различные величины, характеризующие диссипацию энергии на поверхностях материалов и покрытий, а также оценить качество этих поверхностей. В данных опытах процесс диссипации энергии трудно назвать трением, поскольку взаимное перемещение поверхности и шарика практически отсутствовало.

Таким образом, описанный метод микродеформаций является неразрушающим и его можно применять к любым материалам и покрытиям, имеющим поли-

рованные плоские участки поверхности.

Литература

1. Миссол В. Поверхностная энергия раздела фаз в металлах. М.: Metallurgia, 1978. 176 с.
2. Савенко И. и др. Применение маятникового метода для анализа механизмов поглощения энергии при качении// Трение и износ. 1988. т. 9, № 2. С. 212–222.
3. Джилавдари И. З. Исследование упругости и упругого гистерезиса поверхности материалов на основе динамики колебаний физического маятника с опорой качения// Трение и износ. 2003. т. 24, № 1. С. 42–48.
4. Джонсон К. Механика контактного взаимодействия. М.: Мир, 1989. 510 с.
5. Физико-химические свойства полупроводниковых веществ. Справочник. М.: Наука, 1978. 339 с.
6. Джилавдари И. З., Русак А.А. Измерение сил трения методом аппроксимации огибающей// Трение и износ. 2000.т. 21, № 5. С. 424–432.

