



Task

Обязательно прочитайте регламент перед выполнением этой задачи.

T [Task](#)M [Marking scheme](#)

A21

Кантилевер — механический объект, который принимает на себя сдвиговые деформации при взаимодействии с исследуемым объектом в нанотехнологиях. Поэтому важно понимать, как связаны напряжение и относительные изменения длины. Прямые измерения механических свойств наноматериалов трудоемки, поэтому эти исследования делаются не растягиванием материала, а анализом надавливания на материал. При сканировании атомно-силовым микроскопом кантилевер изгибается, и анализ этих изгибных деформаций и определение модуля Юнга становится важной задачей для исследования механических свойств наноматериалов. (A)

(B)

Общее • A. Назад • B. Включить/выключить лазер • C. Лазерный модуль • D. Отражатель: его положением можно точно управлять стрелочками возле него. Также его можно двигать мышкой. • E. Положение отражателя: точность определения его координат 1×10^{-3} м, угла – 0.1° • F. Позиционно-чувствительный детектор, PSD • G. Положение PSD: точность определения его координат 1×10^{-3} м, угла – 0.1° • H. Регистрирующая система PSD: ее положением можно точно управлять стрелочками возле нее. Также ее можно двигать мышкой по горизонтали. Границы системы находятся в диапазоне $\pm 1 \times 10^{-3}$ м по горизонтали и вертикали. • I. Регистрирующая система PSD: начать запись • J. Регистрирующая система PSD: остановить запись • K. Регистрирующая система PSD: сбросить запись • L. История записей регистрирующей системы PSD: точность измерений равна 0.0001×10^{-3} м, максимальная длительность записи – 180 секунд. С данными можно взаимодействовать через график, кликнув левой кнопкой мыши или стрелочками на клавиатуре. • M. Частота регистрирующей системы PSD: 1 Гц • N. Держатель кантилевера: координаты левого верхнего угла держателя – (0, 0). кантилевер устанавливается на верхнюю плоскость к левому ребру.

• O. Манипулятор точечной нагрузкой: можно изменять силу, двигая красный ползунок по горизонтали. • P. Микроманипулятор точечной нагрузкой: можно изменять силу, нажимая левой кнопкой мыши на кнопки. • Q. Датчик точечной нагрузки: точность до 0.01×10^{-9} Н

• R. Датчик тока нагревателя: точность до 1×10^{-3} А • S. Датчик температуры нагревателя: точность до 0.1 • C • T. Уменьшить ток нагревателя: каждый клик на 2×10^{-3} А • U. Увеличить ток нагревателя: каждый клик на 2×10^{-3} А • V. Кнопка, чтобы установить (принять) введенное значение тока. Примечание: время, необходимое для нагрева или охлаждения образца, соответствует временам этих процессов в реальном мире. Это время НЕЛЬЗЯ сбросить произвольно. Т.е. время охлаждения будет БОЛЬШИМ, если вы перегреете образец излишне большим током.

• W. Выбор образца: чтобы выбрать образец, нажмите на кнопку, соответствующую ему.

Часть А. Юстировка оптического пути

Измерение отклонения кантилевера оптическим методом напрямую — не простая задача. Однако, используя прямолинейность и отражение лазера, мы можем измерять отражение с помощью детектора PSD. Длина кантилевера L в нашем эксперименте равна 100×10^{-6} м. Используйте программу 1A и ответьте на вопросы A1 – A3.

A1^{0.60} Спроектируйте и соберите оптическую установку так, чтобы лазерное пятно попадало в середину отражающей области кантилевера. Убедитесь, что лазерное пятно может стабильно появляться рядом с начальной точкой детектора PSD. Нарисуйте и укажите относительное положение (координаты и углы) каждого компонента на листе ответов.

A2^{0.80} Поскольку кантилевер будет возмущён при включении устройства, для достижения стабильного состояния может потребоваться некоторое время. После включения прибора в правом нижнем углу программы отобразится положение светового пятна на PSD и время. Записывайте положение светового пятна d на PSD каждые 3 секунды при внешнем возмущении после нажатия кнопки "Запись" ("Record"). Запишите не менее 40 точек данных, а затем нажмите кнопку "Стоп" ("Stop"), чтобы остановить сбор данных.

A3^{1.00} Используя **стабильный участок** данных, полученных в A2, найдите исходное значение положения пятна с учетом флуктуаций эксперимента. (\bar{d} — среднее значение d).

Примечание : Для удобства измерения мы предполагаем, что кантилевер достиг своего стабильного состояния под воздействием возмущения окружающей среды, то есть вибрация оптических компонентов не влияют на измеренное значение.

Часть В. Деформация кантилевера и определение модуля Юнга.

Модуль Юнга материала кантилевера может быть получен с помощью атомно-силового микроскопа или тестера наноиндентирования для приложения внешней силы к свободному концу кантилевера. Измеряя деформацию, можно найти модуль Юнга. Если к кантилевера прикладывается сила и величина деформации не превышает предел упругости материала, то сила и смещение свободного конца связаны соотношением:

$$\delta = \frac{FL^3}{EI}$$

где F — сила приложенная к крайней точке, E — модуль Юнга; I — момент инерции поперечного сечения кантилевера, L — длина кантилевера, и δ — величина смещения при изгибе. Момент инерции поперечного сечения I физическая величина, которая показывает влияние поперечного сечения тела на деформацию изгиба этого тела. Момент инерции поперечного сечения может вычислен простым интегрированием. Как показано на рисунке 2, поперечное сечение кантилевера имеет толщину t и ширину w . Момент инерции поперечного сечения после интегрирования:

$$I = \int_A y^2 dA = \frac{1}{12}wt^3$$

Кантилевер в нашем эксперименте имеет длину $L = 100 \times 10^{-6}$ м, ширину $w = 35 \times 10^{-6}$ м, и толщину $t = 0.20 \times 10^{-6}$ м. В качестве материала кантилевера используется кремний, его модуль Юнга $E = 280 \times 10^9$ Па.

Используйте программу 1В для вопросов В1— В3.

В1^{1.00} Спроектируйте и соберите оптическую установку для случая когда внешняя сила равна 0 Н. Лазерный луч должно попадать в середину отражающей области кантилевера. Лазерный луч должно стабильно появляться рядом с центром детектора PSD. Запишите данные в таблицу, чтобы получить исходное значение величины d_0 . Это положение светового пятна на PSD устанавливается как отклонение $\Delta d = 0$. Затем приложите к кантилеверу пять различных величин внешних сил и запишите результаты эксперимента в таблицу на листе ответов.

В2^{1.00} Заполнить таблицу. Постройте график величины смещения изгиба δ (ось y) от $\overline{\Delta d}$ (среднее смещение светового пятна на PSD, ось x).

В3^{0.40} Определите коэффициент C_1 в формуле оптического рычага $\delta = C_1 \overline{\Delta d}$ (рис. 3).

Часть С. Двухслойный кантилевер

Двухслойный кантилевер — это конструкция, часто используемая в нанотехнологиях (например, печатная плата IC или нано-тормоз). Она состоит из двух слоев разных материалов, которые расширяются по разному при нагревании. В теории балок Тимошенко учтены различия в жесткости на изгиб. На рисунке 4 показана двухслойный кантилевер, состоящая из двух слоев, с толщинами t_1 и t_2 , коэффициенты теплового расширения α_1 и α_2 , модули Юнга E_1 и E_2 .

Согласно теории балок, относительное удлинение для этих двух слоёв

$$\gamma_1 = \alpha_1 \Delta T + \frac{P_1}{w t_1 E_1} + \frac{t_1}{2r}$$

$$\gamma_2 = \alpha_2 \Delta T + \frac{P_2}{w t_2 E_2} + \frac{t_2}{2r}$$

где P_i — полная сила, ΔT — изменение температуры, w — ширина, r — радиус кривизны. Полная сила должна быть сбалансирована как показано на рис. 4. Соотношение между результирующим моментом сил M и полной силой P_i :

$$M = \sum_i P_i \frac{h}{2}$$

Результирующий момент M является функцией жесткости на изгиб $E_i I_i$ и радиуса кривизны r :

$$M = \sum_i \frac{E_i I_i}{r}$$

где E_i — модуль Юнга, I_i — момент инерции. Из граничных условий $\gamma_1 = \gamma_2$ получается следующее уравнение:

$$\kappa = \frac{1}{r} = \frac{(\alpha_1 - \alpha_2)(T - 300)}{\frac{2}{hw} \left(\frac{t_1 E_1 + t_2 E_2}{t_1 E_1 t_2 E_2} \right) (E_1 I_1 + E_2 I_2) + 0.5h}$$

$$\delta = \kappa L^2$$

Двухслойный кантилевер показан на рис. 5. Параметры этого эксперимента: длина $L = 100 \times 10^{-6}$ м, ширина $w = 35 \times 10^{-6}$ м, толщина $t_1 = 0.04 \times 10^{-6}$ м, толщина $t_2 = 0.2 \times 10^{-6}$ м, тепловые коэффициенты расширения $\alpha_1 = 14.2 \times 10^{-6}/\text{K}$, $\alpha_2 = 0.8 \times 10^{-6}/\text{K}$; моменты инерции поперечного сечения $I_1 = 1.867 \times 10^{-28}$ and 1.867×10^{-28} м⁴ and $I_2 = 2.333 \times 10^{-26}$ м⁴. Нижний слой сделан из кремния, его модуль Юнга $E = 280 \times 10^9$ Па. Используйте программу 1C для вопросов C1 — C3.

C1^{1.00} Спроектируйте и соберите оптическую установку. Лазерный луч должно попадать в середину отражающей области кантилевера. Запишите данные для комнатной температуры и найдите исходное значение величины d_0 . Используйте его для $\Delta d = 0$. Затем увеличьте температуру до более высокого значения, подождите, пока двухслойный кантилевер не стабилизируется, затем запишите данные. Измерьте как минимум 5 различных температур и запишите данные в таблицу на листе ответов.

C2^{1.00} Заполните таблицу. Постройте график величины смещения изгиба δ (ось y) от температуры T (ось x). Найдите коэффициент наклона. Вы можете использовать связь между δ и Δd из В3.

C3^{0.60} Используя данные из C2 вычислите модуль Юнга для верхнего материала.

Часть D. Изгиб балки кантилевера при адсорбции молекул

Составной кантилевер может использоваться как наносенсор. Например, на рисунке 6 приведен пример белкового сенсора: двухслойный кантилевер поверхность которого покрыта белковым слоем. При измерении другой белок адсорбируется на кантилевер. Из-за Ван-дер-Ваальсового взаимодействия между молекулами, адсорбция белка вызывает некоторое поверхностное распределение напряжения (которое зависит от белка) и детектируется изгиб кантилевера.

Схематическое изображение кантилевера, используемое в этом эксперименте, показано на рисунке 6В. Длина $L \sim 100 \times 10^{-6}$ м, $w \sim 35 \times 10^{-6}$ м, $t_2 \sim 0.2 \times 10^{-6}$ м и $t_1 \sim 0.04 \times 10^{-6}$ м. Нижний слой выполнен из кремния. Модуль Юнга кремния 280×10^9 Па. Коэффициент покрытия (CR) ~ 0 для образца №0 (Sample 0), $\sim 1\%$ для образца №1 (Sample 1). Толщиной и модулем Юнга белкового слоя можно пренебречь. Эффективная жесткость на изгиб $ET^* \approx 1.84 \times 10^{-13}$ Н · м². Используйте программу 1D для заданий D1-D4.

D1^{0.60} Спроектируйте и соберите оптическую установку для образца №0. Пятно лазера должно попадать в центр отражающей области и затем в центр детектора PSD. Укажите исходное значение величины d_0 в листе ответов. Смещение Δd лазерного пятна установите $\Delta d = 0$. Повторите эксперимент для образца №1. Запишите в лист ответов результаты измерений. *Примечание:* у образца №1 самый большой коэффициент покрытия среди всех образцов.

D2^{0.60} Пусть смещение при изгибе δ зависит от параметров следующим образом: $\delta = C_2 \frac{CR}{ET^*} L^4$. Используя результаты своих измерений в D1, найдите C_2 . Вы можете использовать связь между δ и Δd из В3.

D3^{0.80} Исследуйте образцы №2 и №3. Белковый слой состоит из того же белка, что и ранее, но отличается коэффициентом покрытия CR . Измерьте смещение пятна лазера Δd на детекторе PSD для обоих образцов. Запишите результаты в лист ответов.

D4^{0.60} Оцените значения CR для образцов №2 и №3 (в процентах).

