

# Распределение упругих деформаций в конических нанопроводах при боковых изгибах

© М.С. Дунаевский, П.А. Алексеев

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,  
194021 Санкт-Петербург, Россия

E-mail: Mike.Dunaeffsky@mail.ioffe.ru

Поступила в Редакцию 2 марта 2022 г.

В окончательной редакции 25 марта 2022 г.

Принята к публикации 25 марта 2022 г.

Рассмотрены упругие деформации в конических нанопроводах. Получено аналитическое выражение для распределения упругих деформаций по длине конического нанопровода. Обнаружено, что при определенных углах конусности в нанопроводах возникает протяженная область достаточно высоких деформаций, сопоставимых или даже больших, чем деформация у основания нанопровода. Так, например, при изгибе конического (коэффициент коничности  $a = -0.7$ ) нанопровода длиной  $L = 1$  мкм и радиусом  $R = 50$  нм на величину  $\Delta z = 200$  нм максимальные значения деформации составляют  $\varepsilon_{xx, \max} = 8\%$ , при этом более 95% нанопровода деформировано на величину  $> 3\%$ .

**Ключевые слова:** упругая деформация, нанопровод, изгиб, угол конусности.

DOI: 10.21883/FTP.2022.07.52751.06

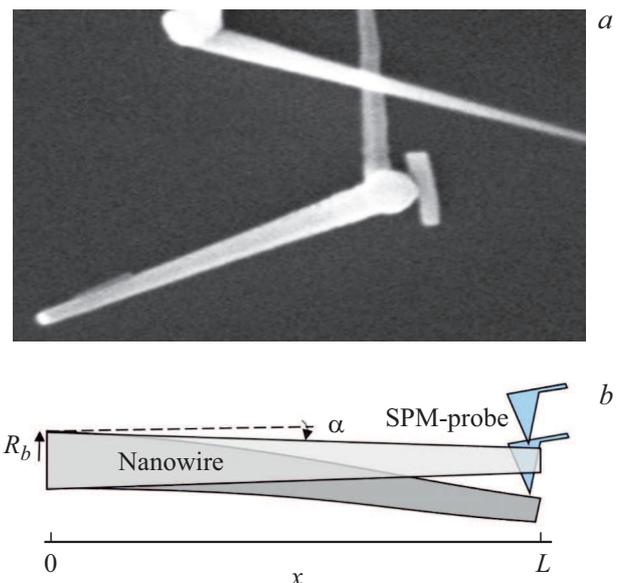
## 1. Введение

В последние годы большой интерес вызывает изучение воздействия механических деформаций на оптические и транспортные свойства полупроводниковых наноструктур. При изгибах полупроводниковых нанопроводов (НП) в них могут наблюдаться значительные упругие деформации (до 11% [1]), при этом сами нанопровода не ломаются. Такое поведение при изгибах существенным образом отличается от изгибов объемных материалов, в которых разрушение происходит уже при деформации  $\sim 1\%$ . Вторая важная особенность тонких нанопроводов заключается в том, что сила, необходимая для их существенного изгиба, достаточно мала и может составлять лишь несколько наноНьютонов. В недавней работе [2] было продемонстрировано, что изгиб  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  ( $x = 0.85$ ) нанопроводов СЗМ-зондом может приводить к увеличению проводимости на несколько порядков. Это открывает возможность создания чувствительных сенсоров и переключателей на основе  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ -нанопроводов. Следует отметить, что при изгибе цилиндрических  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ -нанопроводов зондом атомно-силового микроскопа в упругодеформируемом слое возникает область с повышенной проводимостью [2], что обусловлено сдвигом положения дна зоны проводимости. В случае изгиба цилиндрических нанопроводов значение осевых упругих деформаций  $\varepsilon_{xx}$  максимально у основания нанопровода и линейно уменьшается  $\varepsilon_{xx} \sim (1-x)$  до нуля в точке приложения силы ( $x = 1$ ). Такое уменьшение деформаций приводит к тому, что при недостаточно высоких концентрациях индия в цилиндрических  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ -нанопроводах может не происходить переключение проводимости. В этой работе выполнен поиск оптимальной формы для управ-

ления распределением упругих деформаций в нанопроводах для повышения эффективности переключения проводимости.

## 2. Результаты

На рис. 1 представлено изображение конических нанопроводов, полученное с помощью сканирующей электронной микроскопии (см. рис. 1, *a*), а также схема реализации боковых изгибов нанопроводов зондом атомно-



**Рис. 1.** *a* — изображение сканирующей электронной микроскопии конических нанопроводов с коэффициентами коничности  $a = -0.8$  и  $a = -0.5$ ; *b* — схема изгибов конического нанопровода

силового микроскопа (см. рис. 1, *b*). Следует отметить, что в ряде работ [2–4] были выполнены эксперименты по контролируемому боковому изгибу цилиндрических нанопроводов с помощью зонда атомно-силового микроскопа. В данной работе мы в рамках теории упругости Эйлера–Бернулли исследуем распределение осевых упругих деформаций по длине изогнутого конического нанопровода.

Стоит сделать некоторое замечание о роли деформаций сдвига при анализе изгибов нанопроводов. Действительно, в общем случае при изгибах балок имеют место как деформации изгиба, так и деформации сдвига. Для учета деформаций сдвига необходимо переходить от теории Эйлера–Бернулли (не учитывающей деформации сдвига) к уравнениям теории Тимошенко. В теории Тимошенко возникает дополнительное слагаемое, пропорциональное величине  $\sim (E/G) \cdot (I/SL^2)$ , где  $E$  — модуль Юнга балки,  $G$  — сдвиговой модуль балки,  $I$  — второй момент площади сечения балки,  $S$  — площадь сечения балки,  $L$  — длина балки. В случае длинных и тонких нанопроводов это слагаемое оказывается малым,  $\sim R^2/L^2$  (где  $R$  — характерный радиус нанопровода). Действительно, для большинства нанопроводов соотношение  $R^2/L^2 < 1/100$ , т.е. поправочное слагаемое, связанное с учетом деформаций сдвига, оказывается достаточно малым. Это соображение обуславливает применение модели Эйлера–Бернулли в данной работе.

Уравнение Эйлера–Бернулли (1) совместно с граничными условиями (2) позволяет определить распределение  $w(x)$  изгибов и осевых деформаций  $\varepsilon_{xx}(x)$  по длине изгибаемого конического НП:

$$\frac{d^2}{dx^2} (EI(x)w''x) = 0, \quad (1)$$

$$w|_{x=0} = w'|_{x=0} = w''|_{x=L} = w'''|_{x=L} + \frac{F}{EI(L)} = 0. \quad (2)$$

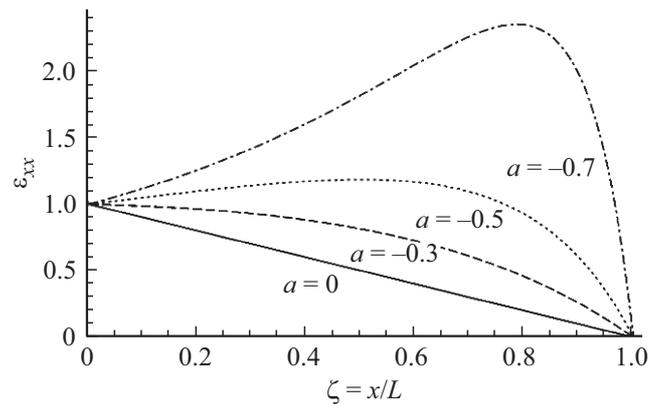
Здесь  $E$  — модуль Юнга нанопровода,  $I(x)$  — момент инерции конического нанопровода,  $L$  — длина нанопровода. Для конического НП с углом коничности  $\alpha$  и радиусом основания  $R_b$  можно получить следующее дифференциальное уравнение 2-го порядка:

$$E \frac{\pi R_b^4}{4} \left(1 + \frac{\alpha}{R_b} x\right)^4 \frac{d^2 w(x)}{dx^2} = F(L - x). \quad (3)$$

Значения осевых деформаций  $\varepsilon_{xx}$  внутри нанопровода линейно возрастают от оси к краям. Вблизи оси значение деформации  $\varepsilon_{xx}$  равно нулю, а по краям нанопровода деформации имеют разные знаки (одна сторона нанопровода сжата, а другая растянута) и достигают максимальных значений  $\varepsilon_{xx,\max}$ :

$$\varepsilon_{xx,\max}(x) = \pm \frac{R(x)}{\rho(x)}. \quad (4)$$

Здесь  $\rho(x)$  — радиус кривизны изогнутого нанопровода в точке  $x$ . Используя формулы (3) и (4), а также



**Рис. 2.** Нормированные профили деформации  $\varepsilon(\xi)/\varepsilon_b$  для конических нанопроводов с коэффициентами коничности  $a = 0$  (сплошная кривая),  $a = -0.3$  (штриховая кривая),  $a = -0.5$  (пунктирная кривая),  $a = -0.7$  (штрихпунктирная кривая).

вводя безразмерную координату  $\xi = x/L$ , деформацию в основании НП  $\varepsilon_b = (F/E)(4/\pi R_b^3)L$  и приведенный параметр конусности  $a = \alpha L/R_b$ , получаем выражение для  $\varepsilon_{xx,\max}$

$$\varepsilon_{xx,\max}(\xi) = \varepsilon_b \frac{1 - \xi}{(1 + a\xi)^3}. \quad (5)$$

На рис. 2 представлены расчетные профили значений нормированных деформаций  $\varepsilon(\xi)/\varepsilon_b$  для конических нанопроводов с коэффициентом конусности  $a = 0$  (сплошная кривая),  $a = -0.3$  (штриховая кривая),  $a = -0.5$  (пунктирная кривая),  $a = -0.7$  (штрихпунктирная кривая). Видно, что при достаточно сильной конусности ( $a < -0.3$ ) в НП появляется протяженная область с деформациями, большими  $\varepsilon_b$ . Эта ситуация качественно отличается от ситуации цилиндрического НП ( $a = 0$ ) или „слабоконического“ НП ( $a > -0.3$ ), когда наибольшие деформации и напряжения возникают только в основании НП. Это свойство может повысить эффективность переключения проводимости в устройствах на основе конических НП [2]. Действительно, в случае латеральных изгибов конического НП InGaAs (с коэффициентом коничности  $a < -0.7$ ) на поверхности НП возникает достаточно длинный проводящий канал вплоть до области контакта зонд–НП.

Определенный интерес представляет вопрос — какая часть нанопровода подвержена деформациям, большим деформации в основании ( $\varepsilon > \varepsilon_b$ ). Детальный вид зависимости размера области сильных деформаций от коэффициента конусности приведен на рис. 3. По оси ординат отложена приведенная длина  $\xi_{\varepsilon > \varepsilon_b}$  сильно деформированного участка нанопровода. Можно видеть, что при малых коэффициентах конусности ( $-0.3 < a < 0$ ) такой области нет, при  $a = -0.52$  сильно деформированный участок занимает 80% нанопровода, при  $a = -0.6$  этот участок занимает 90% нанопровода, а при  $a < -0.654$  этот участок занимает уже более 95% нанопровода. Такого рода на-

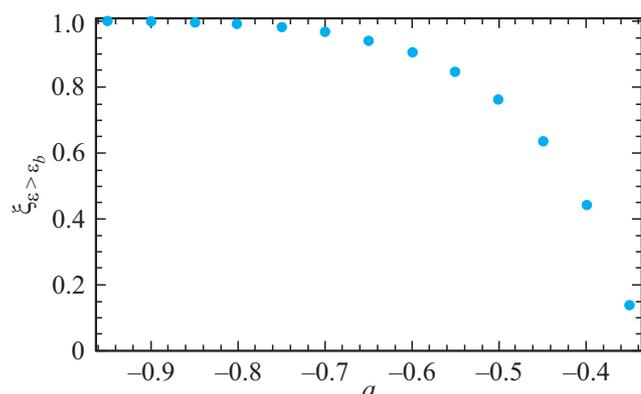


Рис. 3. Зависимость приведенной длины  $\xi_{\varepsilon > \varepsilon_b}$  сильно деформированного участка нанопровода от коэффициента коничности  $a$ .

нопровода (с коэффициентом конусности  $a < -0.65$ ) могут являться перспективными структурами для переключения проводимости при боковых изгибах. Так, например, при изгибе конического (коэффициент коничности  $a = -0.7$ ) нанопровода длиной  $L = 1$  мкм и радиусом  $R = 50$  нм на величину  $\Delta z = 200$  нм максимальные значения деформации составляют  $\varepsilon_{xx, \max} = 8\%$ , при этом  $> 95\%$  нанопровода деформировано на величину  $> 3\%$ .

### 3. Заключение

В данной работе рассмотрены упругие деформации в конических нанопроводах. Выполненные расчеты показывают, что распределение упругих деформаций в конических нанопроводах значительно отличается от ситуации в цилиндрических нанопроводах. Получено аналитическое выражение для распределения упругих деформаций по длине конического нанопровода. Обнаружено, что при определенных углах конусности в нанопроводах возникает протяженная область достаточно высоких деформаций, сопоставимых или даже больших, чем деформация у основания. При достаточно высоких углах конусности область высоких деформаций покрывает практически всю длину нанопровода, что позволяет более эффективно переключать проводимость в таких нанопроводах. Так, например, при изгибе конического (коэффициент коничности  $a = -0.7$ ) нанопровода длиной  $L = 1$  мкм и радиусом  $R = 50$  нм на величину  $\Delta z = 200$  нм максимальные значения деформации составляют  $\varepsilon_{xx, \max} = 8\%$ , при этом  $> 95\%$  нанопровода деформировано на величину  $> 3\%$ .

### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### Список литературы

- [1] Y. Wang, L. Wang, H. Joyce, Q. Gao, X. Liao, Y. Mai, H. Tan, J. Zou, S. Ringer, H. Gao, C. Jagadish. *Adv. Mater.*, **23**, 1356 (2011).
- [2] P. Alekseev, V. Sharov, M. Dunaevskiy, D. Kirilenko, I. Ilkiv, R. Reznik, G. Cirlin, V. Berkovits. *Nano Lett.*, **19**, 4463 (2019).
- [3] M. Dunaevskiy, P. Geydt, E. Laähderanta, P. Alekseev, T. Haggrén, J. Kakko, H. Jiang, H. Lipsanen. *Nano Lett.*, **17**, 3441 (2017).
- [4] P. Alekseev, M. Dunaevskii, A. Stovpyaga, M. Lepsa, A. Titkov. *Semiconductors*, **46**, 641 (2012).

Редактор Г.А. Оганесян

### Elastic deformations distribution in laterally bent conical nanowires

M.S. Dunaevskiy, P.A. Alekseev

loffe Institute,  
194021 St. Petersburg, Russia

**Abstract** The elastic deformations in the conical nanowires are considered. An analytical expression was obtained for the distribution of elastic deformations along the length of the conical nanowire. It was found that at certain cone angles in nanowire there is an extended area of sufficiently high deformations comparable or even large than the deformation at the base of the nanowire.