

## Измерения локальных модулей Юнга микро- и нанотрубок дифенилаланина

В.В. Южаков<sup>1</sup>, А.С. Нураева<sup>1</sup>, С.Г. Васильев<sup>1</sup>, П.С. Зеленовский<sup>1</sup>, Д.С. Чезганов<sup>1</sup>,  
А.Л. Холкин<sup>1,2</sup>, В.Я. Шур<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Институт естественных наук и математики, Уральский федеральный университет,  
Екатеринбург, 620000, Россия  
vladimir.yuzhakoff@mail.ru*

<sup>2</sup>*Department of Physics & CICECO – Aveiro Institute of Materials, University of Aveiro, Aveiro, 3810-193  
Portugal*

Значения локальных модулей Юнга микро-и нанотрубок дифенилаланина были получены методом механического наноиндентирования. Показано, что в неполярной плоскости модуль Юнга зависит от содержания воды в наноканалах. Впервые получены экспериментальные значения модуля Юнга в полярной плоскости.

## Measurements of local Young's moduli of diphenylalanine micro- and nanotubes

V.V. Yuzhakov<sup>1</sup>, A.S. Nuraeva<sup>1</sup>, S.G. Vasilev<sup>1</sup>, P.S. Zelenovskiy<sup>1</sup>, D.S. Chezganov<sup>1</sup>,  
A.L. Kholkin<sup>1,2</sup>, V.Ya. Shur<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*School of Natural Sciences and Mathematics, Ural Federal University, 620000 Ekaterinburg, Russia  
vladimir.yuzhakoff@mail.ru*

<sup>2</sup>*Department of Physics & CICECO – Aveiro Institute of Materials, University of Aveiro, Aveiro, 3810-193  
Portugal*

The values of the local Young's moduli of micro- and nanotubes of diphenylalanine were obtained by mechanical nanoindentation. It is shown that in the nonpolar plane the Young's modulus depends on the water content in the nanochannels. The experimental values of Young's modulus in the polar plane were obtained for the first time.

Самоорганизация биоорганических материалов является удобным инструментом для изготовления различных функциональных микро- и наноустройств [1]. Недавно внимание исследователей привлекли нанотрубки ароматического дипептида дифенилаланина (ДФА), состоящего из двух молекул аминокислоты фенилаланин (ФА), которые обладают выраженными пьезоэлектрическими [2], сегнетоэлектрическими [3], и пирозлектрическими [4] свойствами и могут быть использованы для создания новых биосенсоров и биоэлектронных и биомолекулярных устройств. Однако их механические свойства, в особенности в направлении, параллельном полярной оси нанотрубки, изучены недостаточно.

В данной работе представлены результаты систематических исследований модулей Юнга микро- и нанотрубок ДФА, выращенных из раствора мономера (Bachem AG, Швейцария) в смеси воды с гексафторизопропанолом (1,1,1,3,3,3-Гексафторо-2-пропанол, НФР). Модули Юнга измерялись локально в 2 направлениях (перпендикулярном и параллельном полярной оси трубки) при помощи сканирующего нанотвердомера НаноСкан-4D (ФГБНУ ТИСНУМ, Россия). Уменьшение количества воды в наноканалах производилось путём контролируемого нагрева микро- и нанотрубок в муфельной электропечи, а также методом лиофильной сушки.

В направлении, перпендикулярном полярной оси микро- и нанотрубок, было обнаружено бимодальное распределение значений локального модуля Юнга с характерными значениями  $E_1=8$  ГПа и  $E_2=24$  ГПа, что было отождествлено с различной степенью заполнения наноканалов микро- и нанотрубок молекулами воды. Для проверки этой гипотезы были проведены контролируемый отжиг исходных микро- и нанотрубок при температуре 80°C в течение 8 часов, а также лиофильная сушка в течение 3 часов. В обоих случаях

наблюдалось смещение распределения модуля Юнга в область малых значений с одним характерным значением  $E=4,7$  ГПа. Данное значение близко к значению, рассчитанному в приближении РВЕ [5] для нанотрубки, канал которой не содержит воду, что подтверждает гипотезу о зависимости значений локального модуля Юнга микроотрубок ДФА от содержания воды в наноканалах.

Для проведения измерений в направлении, параллельном полярной оси, микроотрубки ДФА заливались эпоксидной смолой для фиксации микроотрубок в вертикальном положении. Показано, что модуль Юнга в полярной плоскости обладает одномодальным распределением с характерным значением, близким к полученным ранее расчётным значениям 15,85 ГПа [5] и 15,91 ГПа [6].

Исследование выполнено с использованием оборудования УЦКП «Современные нанотехнологии» УрФУ при финансовой поддержке гранта Президента РФ для молодых ученых (МК-2294.2017.2) и Правительства РФ (акт 211, соглашение 02.А03.21.0006).

1. J.-M. Lehn, *Science* **295**, 2400 (2002).
2. S. Vasilev et al, *J. Phys. Chem. Solids* **93**, 68 – 72 (2016)
3. Z. Gan, X. Wu, X. Zhu, J. Shen, *Angew. Chem. Int. Ed. Engl.* **52**, 2056 (2013).
4. A. Esin et al, *Appl. Phys. Lett.* **109**, 142902 (2016).
5. I. Azuri et al, *J. Am. Chem. Soc.* **136**, 963 (2014).
6. P. Zelenovskiy, I. Kornev, S. Vasilev, *Phys. Chem. Chem. Phys.* **18**, 29681 (2016).