

аномальное поведение – логопериодические осцилляции около фрактальной размерности спектра в зависимости от температуры в низкотемпературном регионе (область колебательного режима). Найдено значение граничной температуры, которая зависит от структурных параметров спектра, а также явное выражение для теплоемкости вне области колебательного режима, которая проявляет монотонное или немонотонное поведение в зависимости от структуры спектра.

1. D. Shechtman, I. Blech, D. Gratias, and J. W. Cahn, Phys. Rev. Lett. 53, 1951 (1984).
2. R. Merlin, K. Bajema, R. Clarke, F. Y. Juang, and P. K. Bhattacharya, Phys. Rev. Lett. 55, 1768 (1985).

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ФАЗОВЫХ ПЕРЕХОДОВ В НАНОТРУБКАХ ДИФЕНИЛАЛАНИНА МЕТОДОМ КОНФОКАЛЬНОЙ МИКРОСКОПИИ КОМБИНАЦИОННОГО РАССЕЯНИЯ

Давыдов А.О.^{*}, Зеленовский П.С., Шур В.Я., Холкин А.Л.

Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург, Россия

*E-mail: blackhole.ck@gmail.com

RAMAN STUDY OF PHASE TRANSITIONS IN DIPHENYLALANINE NANOTUBES

Davydov A.O.^{*}, Zelenovskiy P.S., Shur V.Ya., Kholkin A.L.

Ural Federal University, Yekaterinburg, Russia

In this work, temperature-driven phase transitions in FF nanotubes were studied by Raman spectroscopy. Lattice vibrations of FF nanotubes were characterized by an effective frequency, which possesses two pronounced features at 100°C and at 140°C. A model of the abnormal structural changes is proposed, and the details of FF cyclization are revealed.

Пьезоэлектрические микро- и нанотрубки дифенилаланина ($C_{18}H_{20}N_2O_3$, FF) являются перспективным материалом для создания новых биосовместимых сенсоров, пьезоэлектрических элементов и т.п. [1-3]. Процесс самосборки и свойства микро- и нанотрубок FF широко обсуждаются в литературе [4]. Недавно было обнаружено необратимое исчезновение пьезоэлектрического отклика и генерации второй гармоники при температуре около 150°C [4]. Предполагается, что этот эффект связан с циклизацией молекул FF [5], однако прямых экспериментальных подтверждений до сих пор не было. В данной работе измерены температурные зависимости спектров КР и предложена модель структурных изменений в нанотрубках.

Исследуемые нанотрубки выращивались из раствора порошка FF (Bachem AG (Швейцария)) в 1,1,1,3,3,3-гексафторо-2-пропанолe с добавлением деионизованной воды [6]. Измерения спектров КР проводились с помощью конфокального микроскопа комбинационного рассеяния Alpha 300AR (WiTec GmbH, Германия), температура контролировалась термостатом Linkam THMS600.

Типичный спектр КР нанотрубок FF состоит из низкочастотных линий решеточных колебаний ($50\text{-}250\text{ см}^{-1}$) и линий характеристических колебаний функциональных групп (более 250 см^{-1}). В этой работе, решеточные колебания нанотрубок FF характеризуются эффективной частотой, которая получается вычислением средневзвешенного значения по интервалу частот от 50 до 250 см^{-1} . Температурная зависимость эффективно жесткости имеет две особенности при температурах 100 и 140°C . Скачок при $T=100^\circ\text{C}$ может быть связан с испарением воды из полостей нанотрубок, тогда как скачок при $T=140^\circ\text{C}$ вызван структурными изменениями отдельных молекул FF. Анализ изменений интенсивности линий характеристических колебаний показал, что при $T=140^\circ\text{C}$ происходит вращение фенильных колец в молекулах FF [7], а также распад карбоксильных и аминогрупп [5]. Наблюдаемые эффекты свидетельствуют об образовании 2,5-дикетопиперазиновой группы, сопровождающемся выделением молекулы воды.

Исследование выполнено с использованием оборудования УЦКП «Современные нанотехнологии» УрФУ за счет гранта Президента РФ для молодых ученых-кандидатов наук (14.Y30.15.6554-МК) и при финансовой поддержке Правительства РФ (постановление 211, контракт 02.A03.21.0006).

1. Tayi A.S., Kaeser A. et al. *Nature Chem.* 7, 281 (2015).
2. Horiuchi S., Tokura Y. *Nature Mater.* 7, 357 (2008).
3. Kholkin A., Gazit E. et al. *ACS Nano* 4, 610 (2010).
4. Bystrov V.S., Bdikin I. et al. *Ferroelectrics* 440, 3 (2012).
5. Amdursky N., Rosenman G. et al. *Biomacromolecules*. 12, 1349 (2011).
6. Zelenovskiy P.S., Shur V.Ya., Vasilev S.G. et al. *Ferroelectrics* 475, 127 (2015).
7. Xinglong W., Xiong S. et al. *J. Phys. Chem.* 116, 9793 (2012).