

# Особенности дифракции на нанотрубках с гофрированной сверхрешеткой

<u>А.Е. Чканов<sup>1</sup></u>, З.Я. Халитов<sup>1</sup>, Д.М. Пашин<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева - КАИ, Казань, Россия

E-mail: andrey.chkanov@gmail.com

## Введение

В последнее время синтезированы первые представители смешанослойных нанотрубок, в которых чередуются слои SnS<sub>2</sub> и SnS [1]. Среди них были впервые найдены «гофрированные» нанотрубки имеющие сверхпериод в продольном направлении.

В результате совместного исследования методами ПЭМ был обнаружен ряд дифракционных эффектов присущих данным структурам. Наряду с дифракционными эффектами присущими коаксиальным и спиральным нанотрубкам [2], по которым возможно определение практически полного набора структурных параметров (параметров решетки, угла хиральности и др.) было отмечено образование на дифракционной картине дополнительных слоевых линий. Было обнаружено, что расстояние между данными слоевыми линиями является обратной величиной от длины сверхпериода трубки.

Для анализа гофррированных структур проводился анализ SnS/SnS2 нанотрубок методом ПЭМ (HRTEM FEI Tehnai F-30 (300 kV)).



Α

Рис. 1. а) ПЭМ-изображение гофрированной нанотрубки с М<Т; б) ПЭМ-изображение гофрированной нанотрубки с М≥Т; в) Увеличенное ПЭМ-изображение слоев нанотрубки.

Рис. 2. Структура и основные параметры гофрированной нанотрубки.

# Рис. 3. Структурная модель данного типа нанотрубок.









Рис. 4. Модельная и экспериментальная микродифракционная картина в случае (M $\geq$ T). Измеренное  $\Delta_s = 0,187$  нм<sup>-1</sup>, что равно 1/ $\lambda$ .



#### Теоретическая часть

Цилиндрические координаты узлов решетки гофрированной нанотрубки (рис. 2):

#### Амплитуда *h0l* рефлексов:

 $A_{S}(R,h_{1}) = N(-1)^{h_{1}} \sum_{t=0}^{T-1} \exp\left(2\pi i \frac{h_{1}}{\lambda} \beta_{t}\right) \sum_{m=0}^{M-1} p_{m} J_{0}(2\pi R \rho_{mt})$ 

Амплитуда *hk0* рефлексов:

$$A_{D}(R,h_{1}) = 2N(-1)^{h_{1}} \sum_{t=0}^{T-1} \exp\left(2\pi i \frac{h_{1}}{\lambda} \beta_{t}\right) \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{\nu=0}^{p_{m}-1} \sum_{q=1}^{\infty} i^{q} \cos\left[q(\varphi_{m\nu}-\varphi^{*})\right] J_{q}(2\pi R\rho_{mt})$$

Решая уравнение четких рефлексов, получаем две предельные модели микродифракционных картин:

Первая (M≥T) (рис. 4), число слоев в нанотрубке больше количества ячеек в одном сверхпериоде. Получается, что положение рефлексов на доп. слоевых линиях полностью совпадают с положением

видна из центра кривизны,

З

*n* – количество длин сверхпериода, На ОСНОВНЫХ ЧЕТКИХ СЛОЕВЫХ ЛИНИЯХ.

 $R_{h_2}^{h_1} \approx \frac{n_2}{a}$ 

т – узлы решеток слоев в пределах волны,

*d* – толщина пары слоев типа А и В,

*а* и *b* – параметры прямоугольной ячейки Бравэ,

Вторая (M<T) (рис. 5), число слоев в нанотрубке меньше количества ячеек в одном сверхпериоде. Получается что, при переходе с одной слоевой линии на другую положение всей серии смещается на величину  $h_1/\lambda$ .  $R_{h_2}^{h_1} \approx \frac{h_2}{2} - \frac{h_1}{2}$ 

### Выводы

Все рефлексы расположены на системе слоевых линий  $z^* = h_1/\lambda$ . Однако наибольшую интенсивность имеют рефлексы основных слоевых линий соответствующих согласованному продольному периоду *a*, а именно  $z^* = h_2/a$ , где  $h_2$  - целое.

При возрастании индекса *l* четкого рефлекса становятся заметными интенсивности дополнительных слоевых линий, так, что ширина интервала (вдоль *z*\*) слоевых линий, обладающих заметной интенсивностью, пропорциональна этому индексу.

В случае М≥Т четкие рефлексы расположены на слоевой линии так же, как у не гофрированной решетки. В случае М<Т серии четких рефлексов смещаются вдоль слоевой линии в зависимости от ее индекса *h*<sub>1</sub>.

Благодарности	Литература
	[1] G. Radovsky, R. Popovitz-Biro, M. Staiger, K. Gartsman, C. Thomsen, T. Lorenz, G. Seifert and
Авторы благодарят проффессора Р. Тенне (Department of Materials and Interfaces, Weizmann Institute of Science, Rehovot) и его научную группу за предоставленные изображения и дифракционные картины нанотрубок.	R.Tenne, Angew. Chem, Intl. Ed. 50 (51), 12316-12320, (2011).
	[2] O. Figovsky, D. Pashin, I. Nasyrov, Z. Khalitov, D. Valeeva. Chemistry & Chemical Technology,
	6, 1, 43-49, (2011).
	[3] O. Figovsky, D. Pashin, Z. Khalitov, D. Valeeva, A. Chkanov. Chemistry & Chemical
	Technology 7 3 $251-256$ (2013)