

**I Международная Тулиновская Конференция по Физике Взаимодействия Заряженных Частиц с Кристаллами**  
 МГУ им. М. В. Ломоносова,  
 25 – 27 мая 2021 г.

# МОДИФИЦИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТИ УГЛЕРОДНОГО ВОЛОКНА ВЫСОКОДОЗНЫМ ОБЛУЧЕНИЕМ ИОНАМИ УГЛЕРОДА

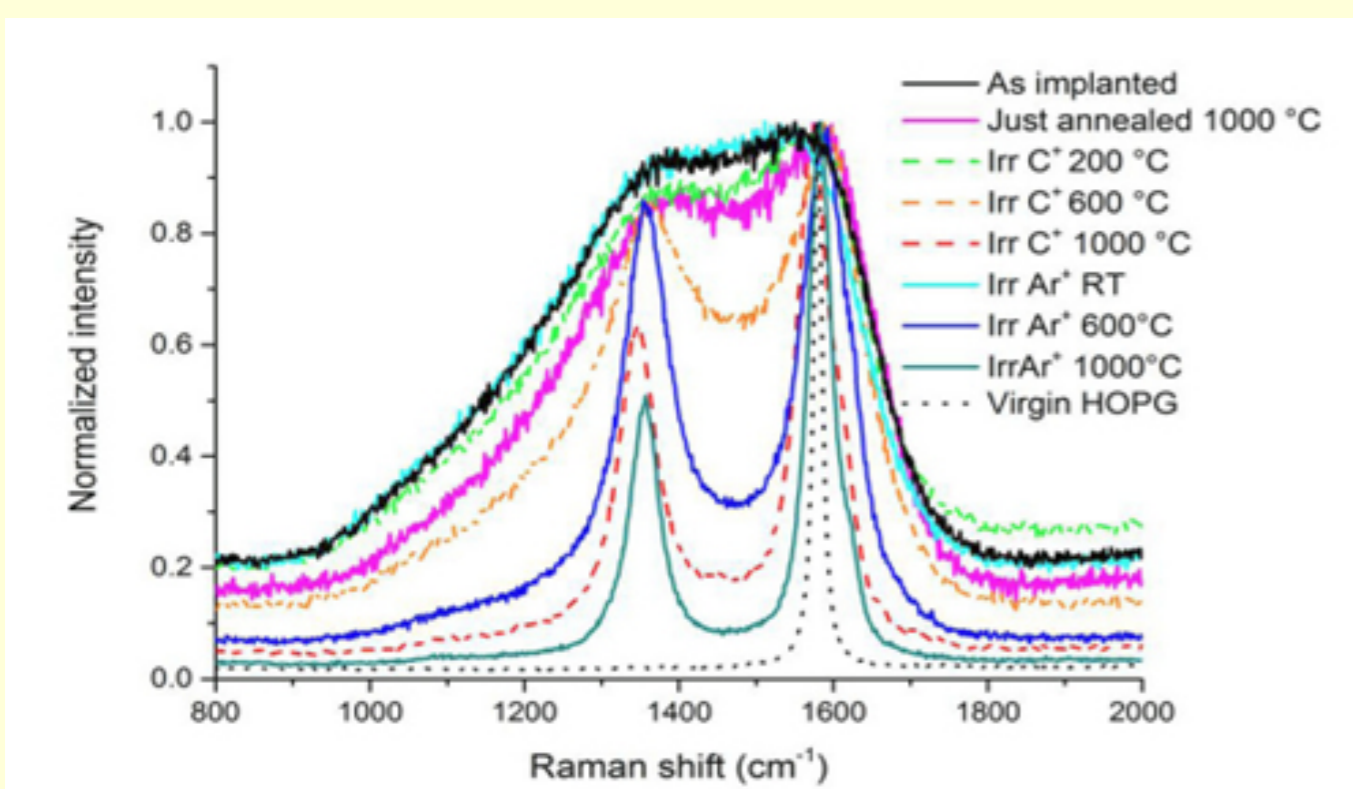


А.М. Борисов<sup>1)</sup>, Е.С. Машкова<sup>2)</sup>, М.А. Тимофеев<sup>2)</sup>,  
 М.А. Овчинников<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>МАИ (НИУ), Москва, Россия;  
<sup>2)</sup>НИИЯФ МГУ, Москва, Россия;

## Актуальность

Ионно-индуцированное изменение морфологии поверхности углеродных волокон перспективно для создания жаропрочных и жаростойких композиционных материалов, для создания химических источников тока и автоэмиссионных катодов.

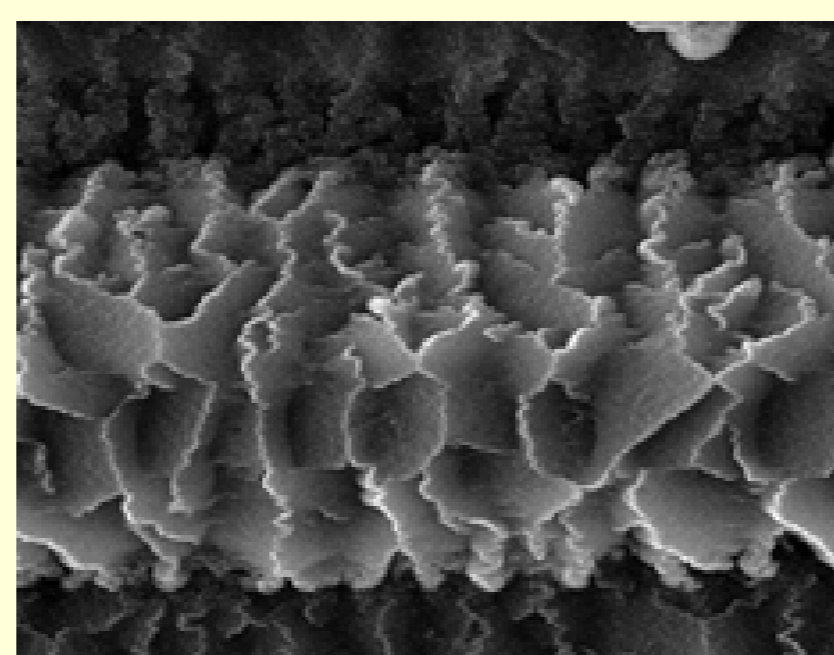


Спектры комбинационного рассеяния света для высокоориентированного пиролитического графита облученного различными дозами ионами аргона

Galy N., et al., NIMB 2017, 406, 235-240



Нановолокна на поверхности углеродного волокна после плазменной обработки  
 B.J. Kim, S.J. Park, J. Colloid Interface Sci. 315, 791 (2007)

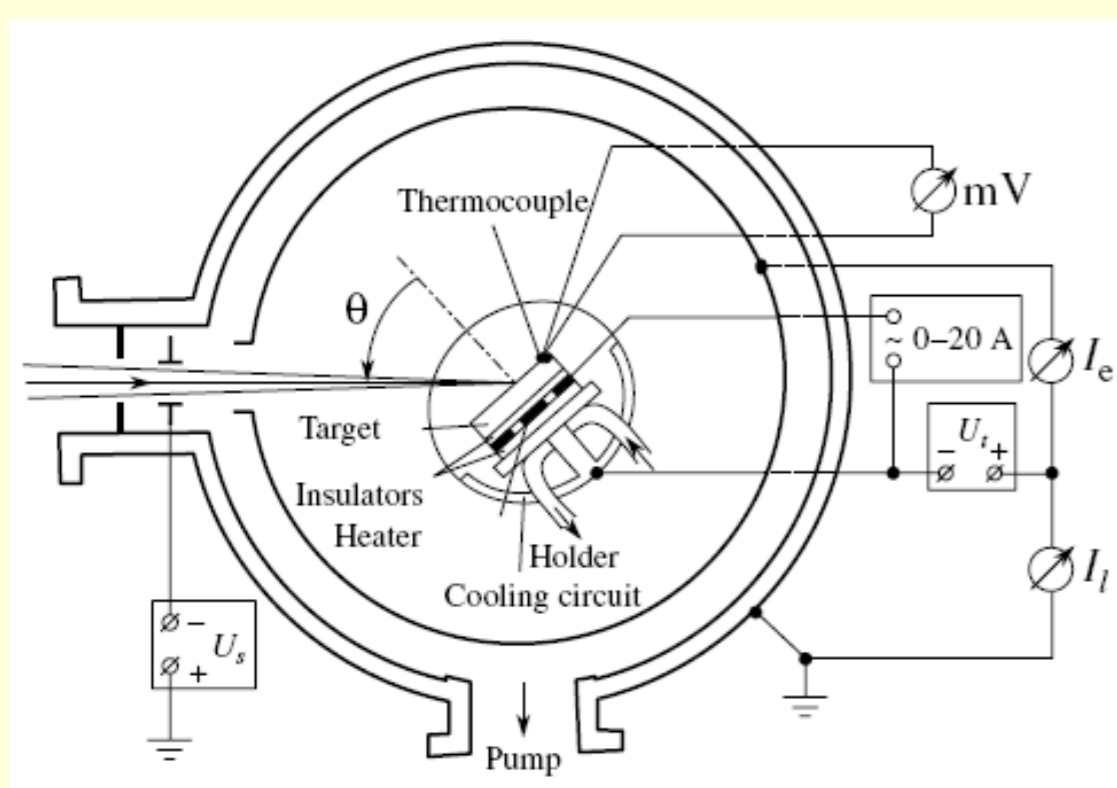


Гофрированная поверхность углеродного волокна после высокодозного облучения ионами аргона

Андрянова, Н. Н. и др // Вакуумная техника и технология. – 2014 г. – Т. 23. – № 1. – С. 85 – 86

Помимо создания углеродных материалов с развитой микро- и наноразмерной структурой актуальным является развитие методов их исследования. Накопление и систематизация новых данных КРС для различных наноструктур является одной из актуальных задач.

## Эксперимент и методики исследования



### Ионное облучение

Масс-монохроматор НИИЯФ МГУ

Ионы: Ar<sup>+</sup>, Ne<sup>+</sup>, N<sup>+</sup>, N<sub>2</sub><sup>+</sup>, C<sup>+</sup>, He<sup>+</sup>

Энергия: 10-30 кэВ

Нормальное падение ионов

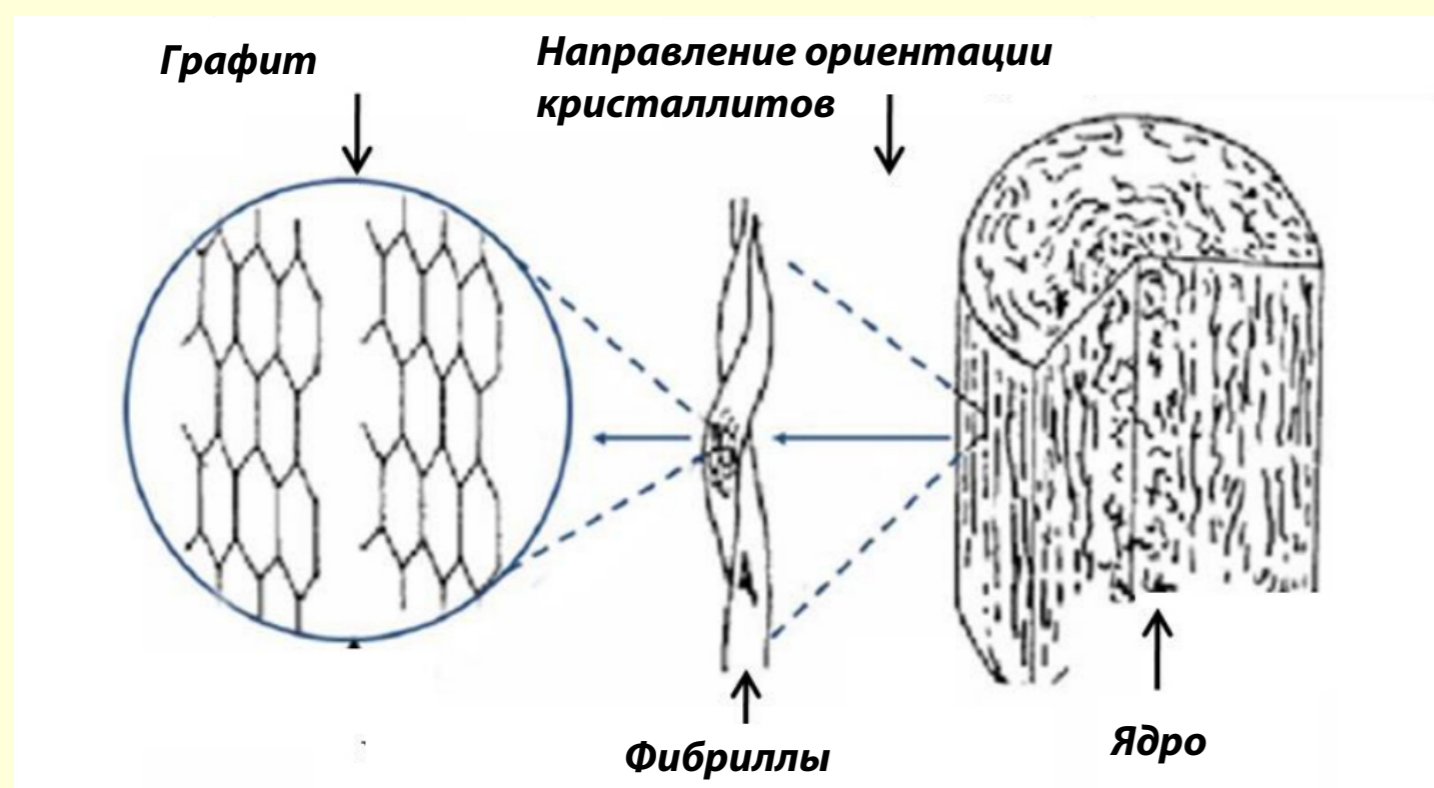
Флуенс:  $t \sim 3-6 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$

Плотность пучка  $\sim 0.4 \text{ мА/см}^2$   
 Температуры облучения 200-600°C

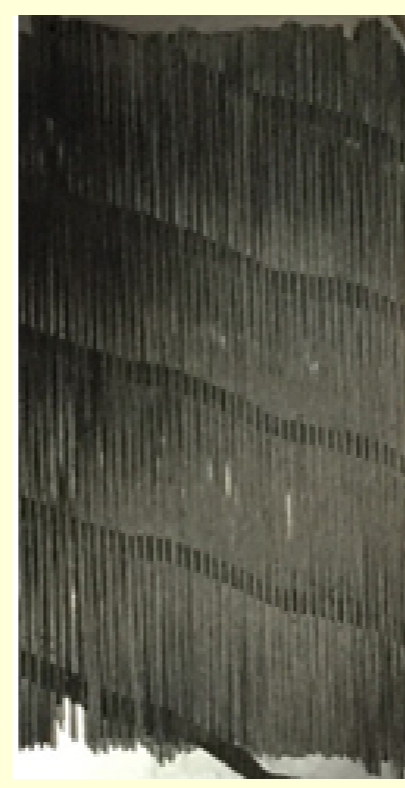
### Методы исследования

- Измерение микрогеометрии поверхности методом лазерной гониофотометрии
- Растровая электронная микроскопия на микроскопе LYRA3TESCAN
- Спектроскопия комбинационного рассеяния света на установке Horiba T64000

## Углеродные волокнистые материалы



Структурная модель углеродного волокна



Лента из волокна "Кулон"

В экспериментах использовали образцы высокомодульного (350 - 470 ГПа) карбонизированного и графитированного волокна из полиакрилонитрила (ПАН):

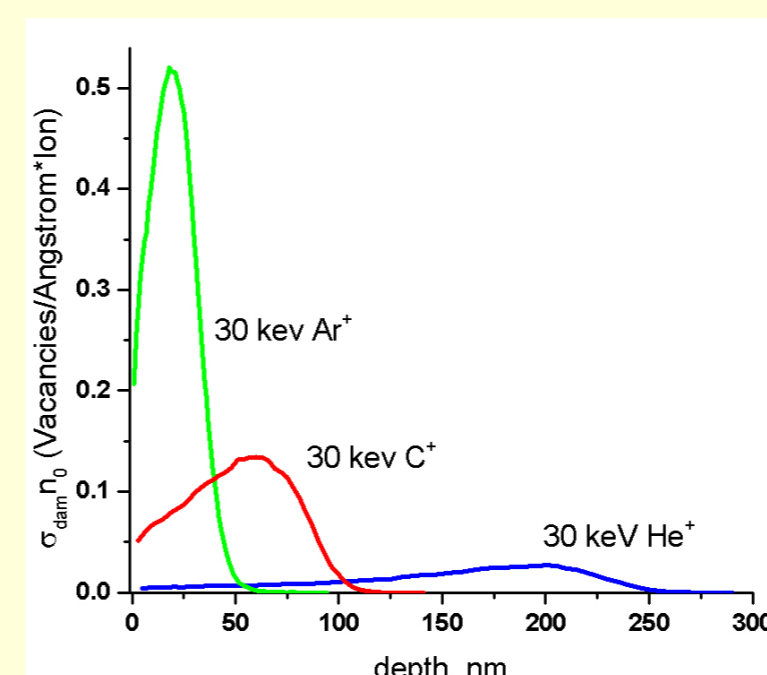
- Нить из углеродного волокна «Кулон»;
- Лента шириной 40 мм из волокна «Кулон»;
- Нить из волокна ВМН-4
- Образцы однонаправленного композита КУП-ВМ, армированного волокнами ВМН-4

## Результаты

### Дефектообразование при высокодозном облучении

#### Учет распыления/напыления

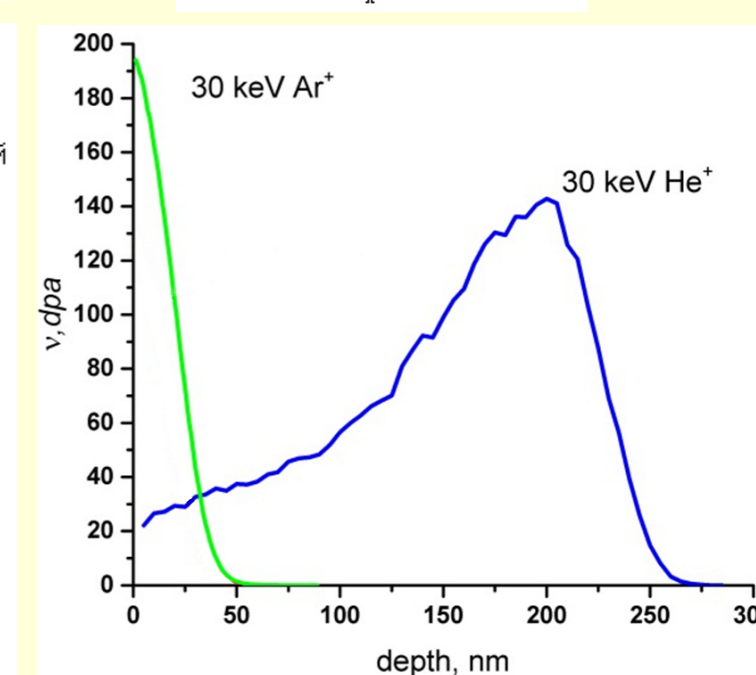
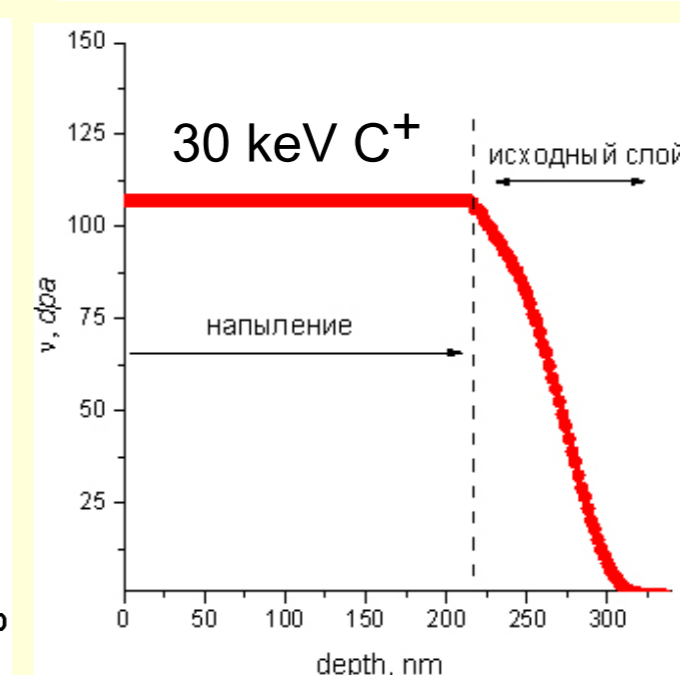
#### Моделирование в SRIM



$$v_{st}(x) = \frac{n_0}{1-\gamma} \int_x^\infty \sigma_{dam}(x') \cdot dx'$$

$$v(x) = \varphi \cdot t \cdot \sigma_{dam}$$

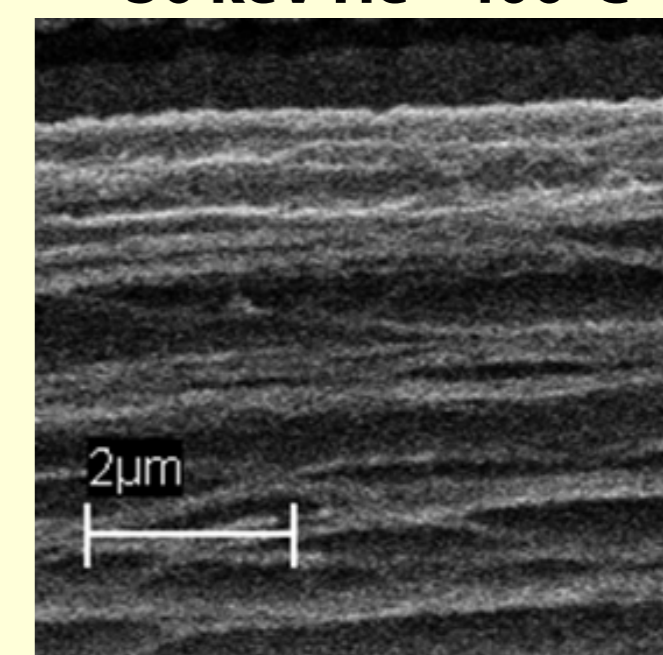
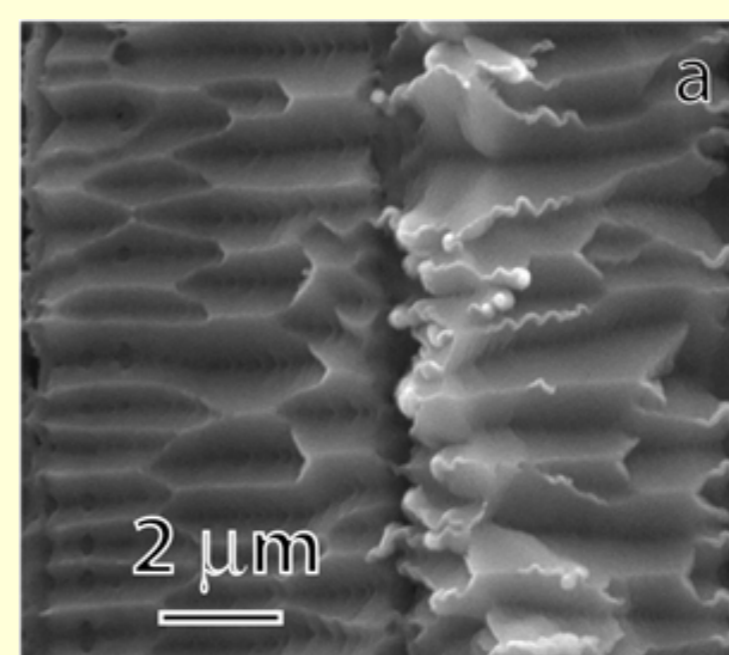
$$v_n(x) = \frac{n_0}{\gamma} \int_x^{\frac{R_d}{2}} \sigma_{dam}(x') \cdot dx'$$



### Рельеф поверхности углеродного волокна при высокодозном облучении

30 keV Ar<sup>+</sup> > 400°C

30 keV He<sup>+</sup> 400°C

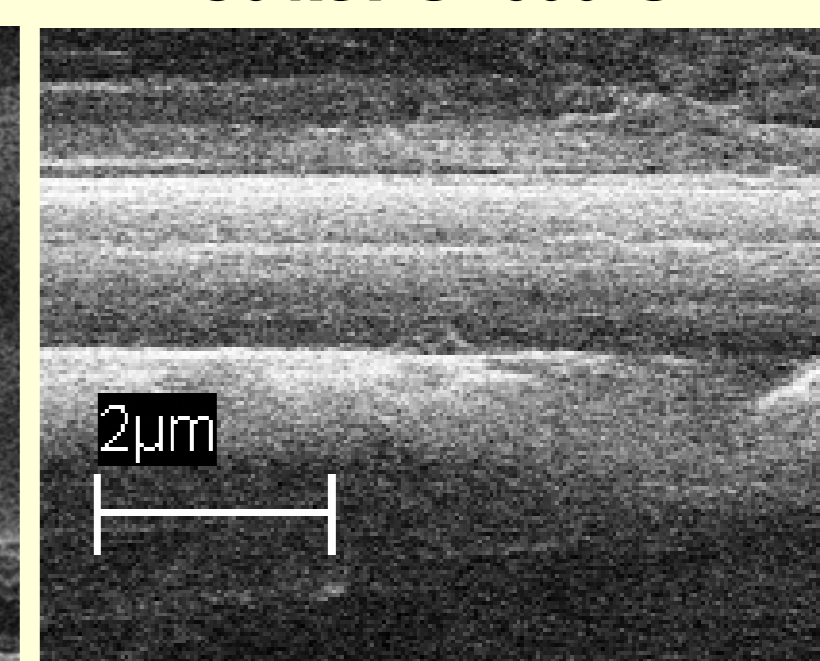
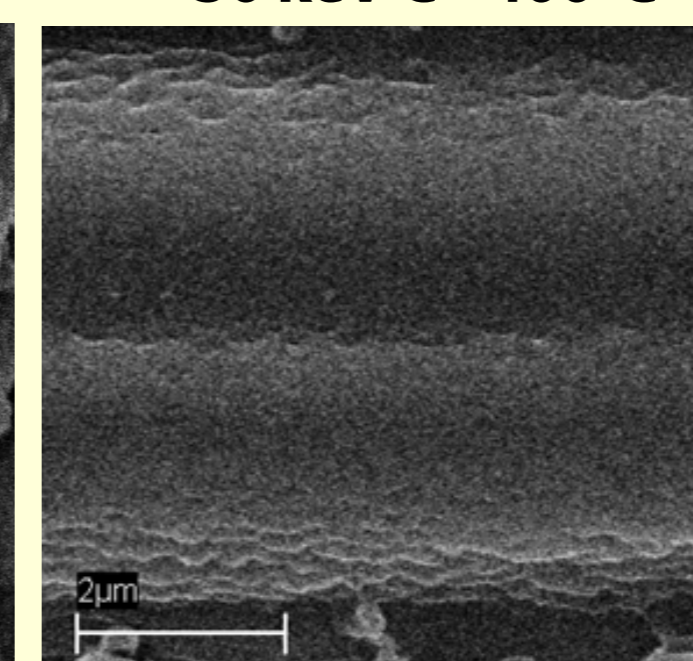
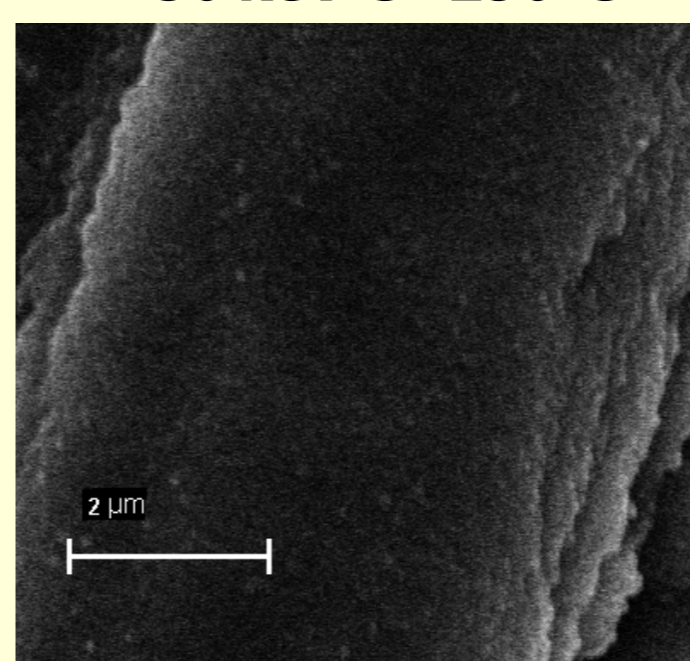


Andrianova, N. N., et al. Vacuum 188 (2021), 110177.

30 keV C<sup>+</sup> 250°C

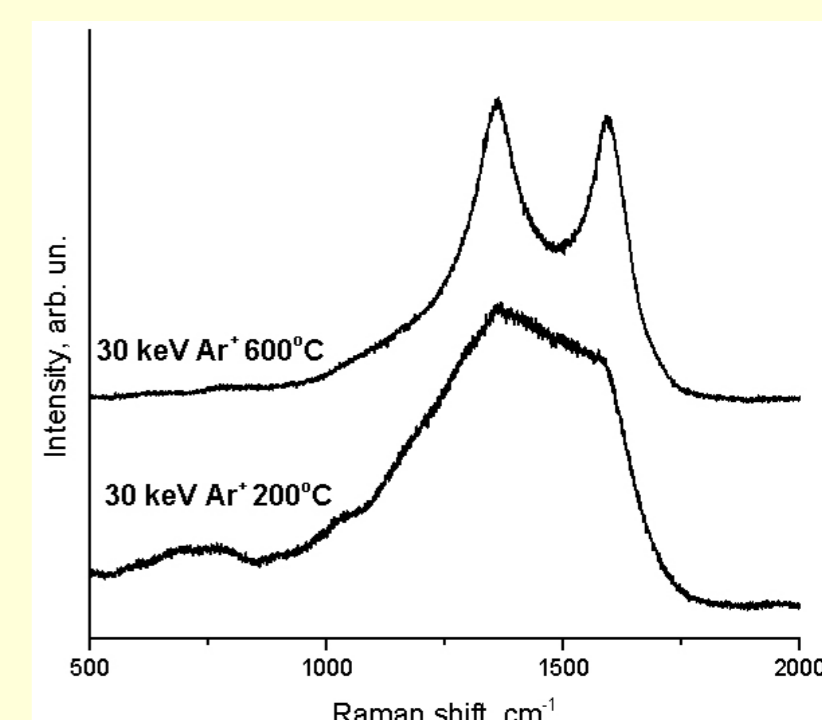
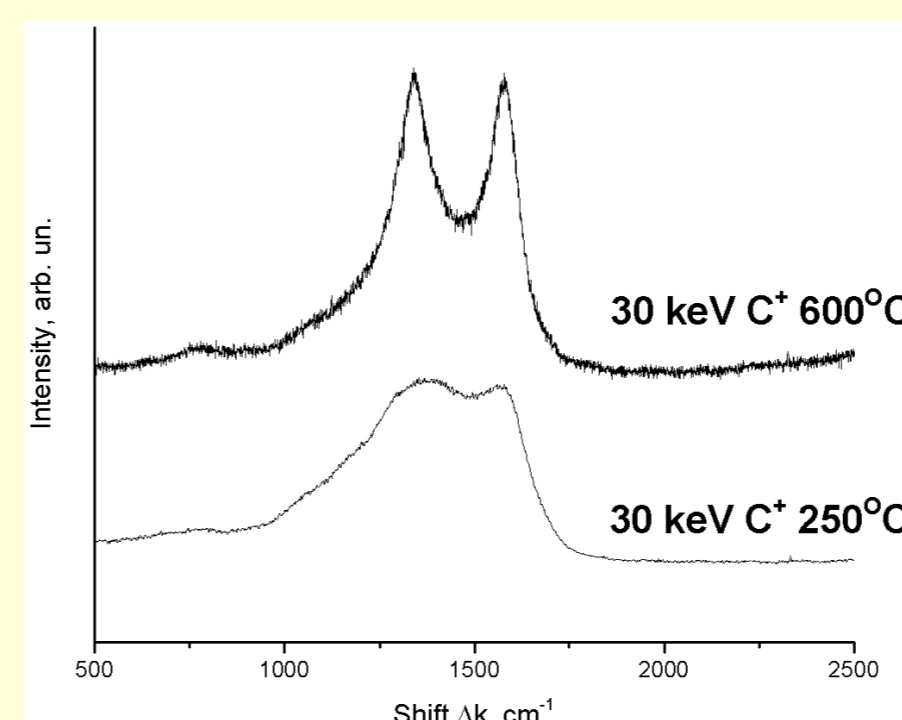
30 keV C<sup>+</sup> 400°C

30 keV C<sup>+</sup> 600°C



Для облучения ионами углерода в интервале температур 200-600°C поверхность волокна сохраняет свою относительную гладкость.

### Структура поверхности углеродного волокна после облучения ионами углерода



Структура волокна после облучения ионами углерода претерпевает такие же изменения, как и при облучении ионами инертных газов.

## Выводы

Высокодозное облучение углеродных волокон ионами углерода с энергией 30 кэВ, в отличие от облучения ионами аргона и гелия с той же энергией, не приводит к образованию на поверхности микроразмерного поперечного и продольного оси волокна рельефа.

Найденные закономерности развития морфологии поверхности на углеродных волокнах, связываются с ионно-стимулированной рекристаллизацией с образованием и ростом двойников кристаллов при релаксации ионно-индуцированных механических напряжений в модифицированном слое.

Причиной отсутствия гофрирования поверхности углеродного волокна при облучении ионами углерода может служить фактор отсутствия в растущем имплантированном слое изменений в распределении дефектов по глубине и связанных с этим радиационно-индуцированных размерных изменений, приводящих к механическим напряжениям в растущем поверхностном слое.