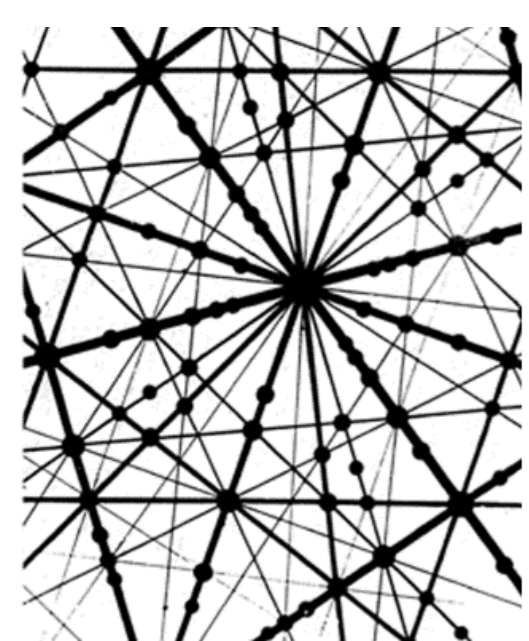




# Эффекты слоистой структуры графита при высокодозном ионно-лучевом распылении



53-я Международная Тулиновская Конференция по Физике Взаимодействия Заряженных Частиц с Кристаллами  
МГУ им. М. В. Ломоносова,  
28 - 30 мая 2024 г.

Андреанова Н.Н.<sup>1,2</sup>, Борисов А.М.<sup>1,2</sup>, Овчинников М.А.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>НИИЯФ МГУ, Москва, Россия

<sup>2</sup>МАИ (НИУ), Москва, Россия

andrianova\_nn@mail.ru

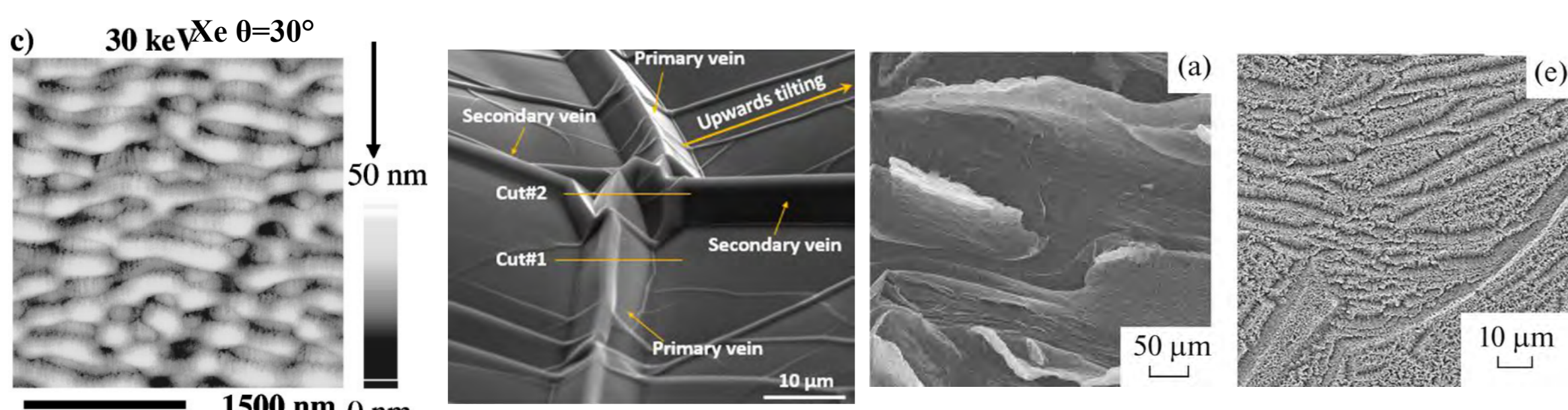
## Актуальность темы

Углеродные материалы широко используются в радиационных полях различной природы:

- Исследуется влияние плазмы изотопов водорода и гелия в термоядерных установках на углеродные материалы [1,2];
- Исследуется применение графитов для создания новейших высокотемпературных реакторов [3];
- Применения углеродных наноматериалов в плазмо-электролитических покрытиях [4].

### Радиационно-индуцированный рельеф поверхности

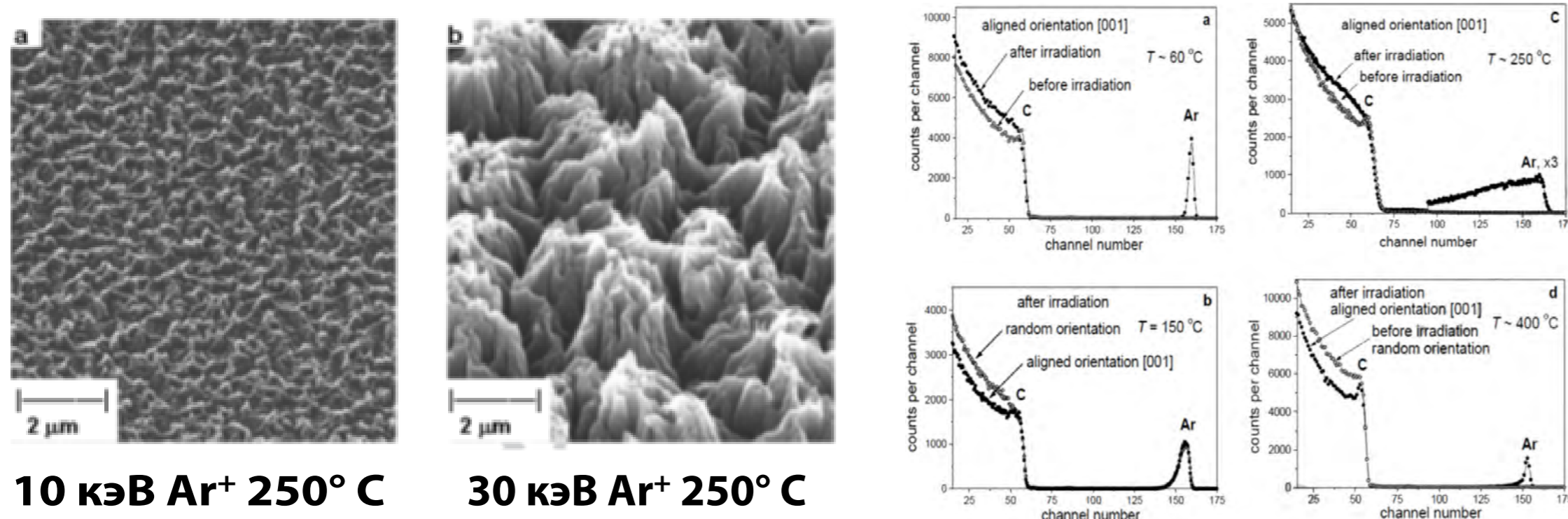
В зависимости от параметров облучения (температуры, типа налетающих частиц, флуенса облучения, угла падения заряженных частиц) как на поверхности, так и в глубине углеродных материалов возникает множество типов структур и морфологий.



Распыление, ионно-индуцированная диффузия и массоперенос [5].

Ионно-индуцированные пластические деформационные процессы [6,7]

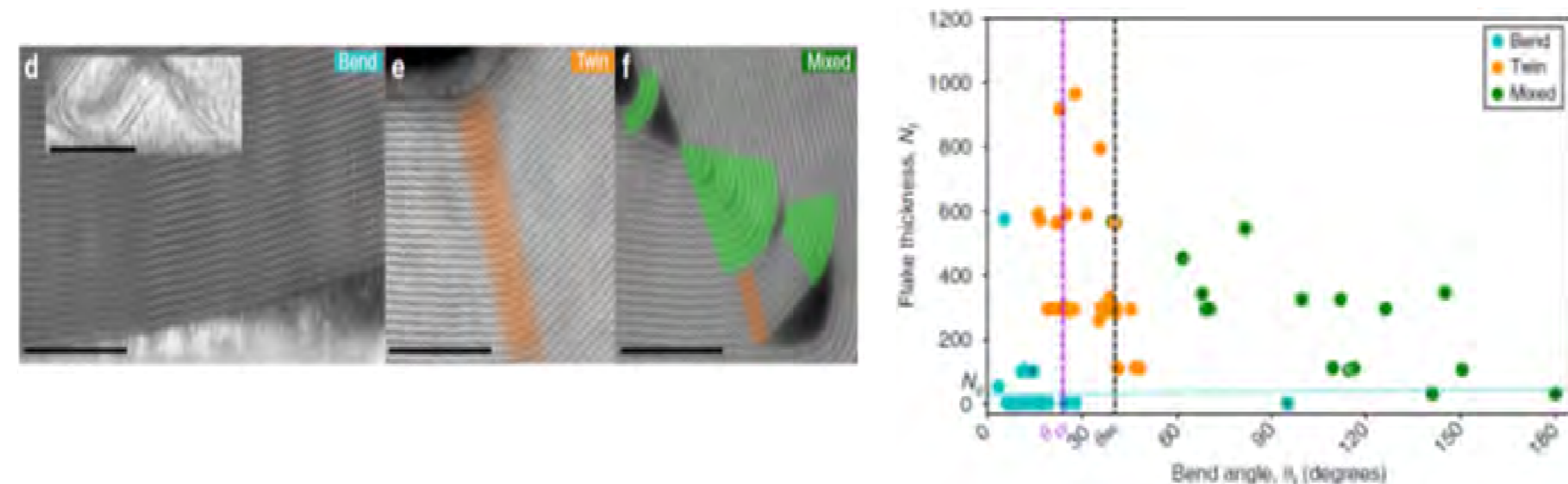
### Аномально глубокое залегание аргона в ВОПГ [8]



10 кэВ Ar<sup>+</sup> 250° С

30 кэВ Ar<sup>+</sup> 250° С

### Влияние толщины материала двумерной структуры на тип пластической деформации



Угол механического изгиба и количество базисных слоев в пленке являются основными параметрами, влияющими на тип процесса пластической деформации. Если кристалл тонкий, около 30-40 слоев ( $N_c$  на графике) и тоньше, доминируют деформации изгиба. Если кристалл толще, то наряду с изгибом происходит внебазисное двойникование [9].

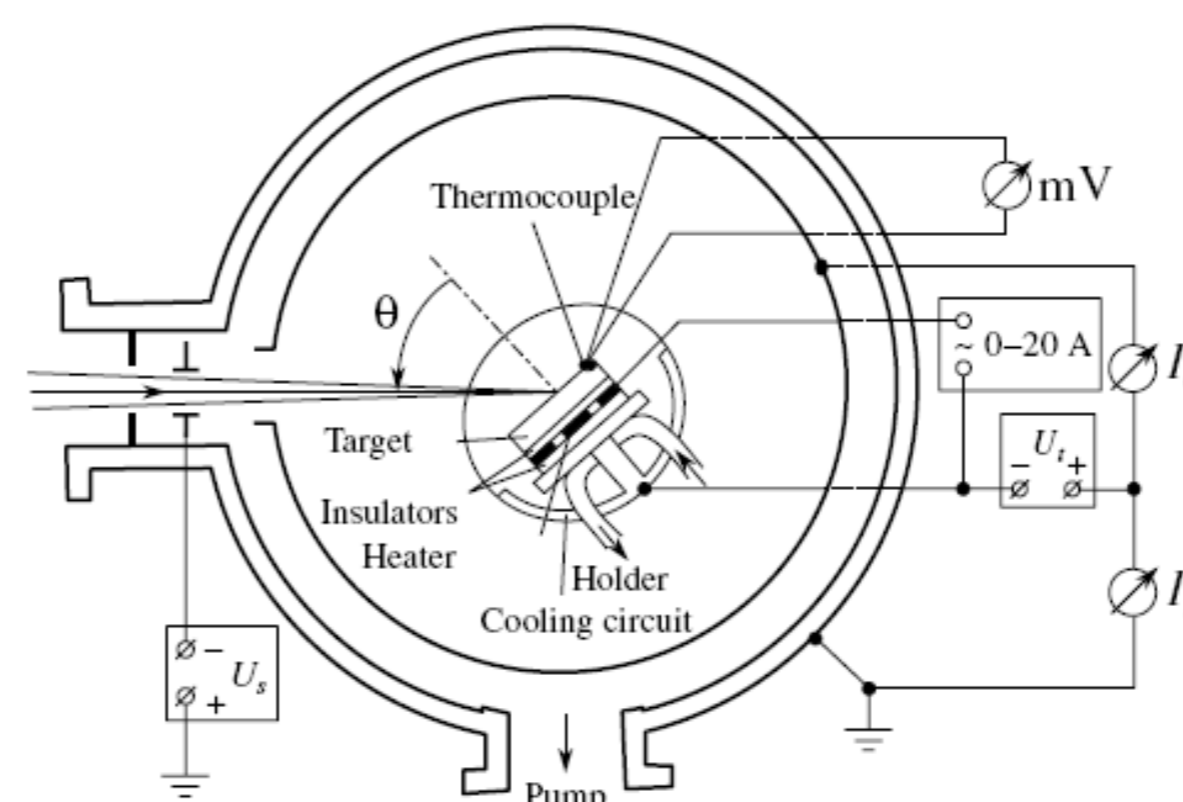
## Выводы

Экспериментально изучено модифицирование поверхности высокоориентированного пиролитического графита облучением ионами аргона с энергией 10, 20 и 30 кэВ и флуенсом облучения  $10^{18} \text{ см}^{-2}$  при температуре 250°С.

Обнаружен аномальный рост ионно-индуцированного рельефа поверхности высокоориентированного пиролитического графита с порогом при энергии ионов 15 кэВ.

Показано, аномальный рост ионно-индуцированного рельефа, как и ранее обнаруженный эффект аномально глубокого залегания ионов аргона в высокоориентированном пиролитическом графите, связан со значительными изменениями геометрии поверхности в результате характерных для наноструктурных графитов ионно-индуцированных процессов пластической деформации.

## Эксперимент и методики исследования



### Методы исследования

- Растровая электронная микроскопия
- Измерение микрогеометрии поверхности
- Моделирование профиля радиационных смещений

### Ионное облучение

Масс-монохроматор НИИЯФ МГУ

Ионы: Ar<sup>+</sup>

Энергия: 10-30 кэВ

Нормальное падение ионов

Флуенс:  $\Phi \sim 3-4 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$

Плотность пучка  $\sim 0.4 \text{ мА/см}^2$

Температуры облучения

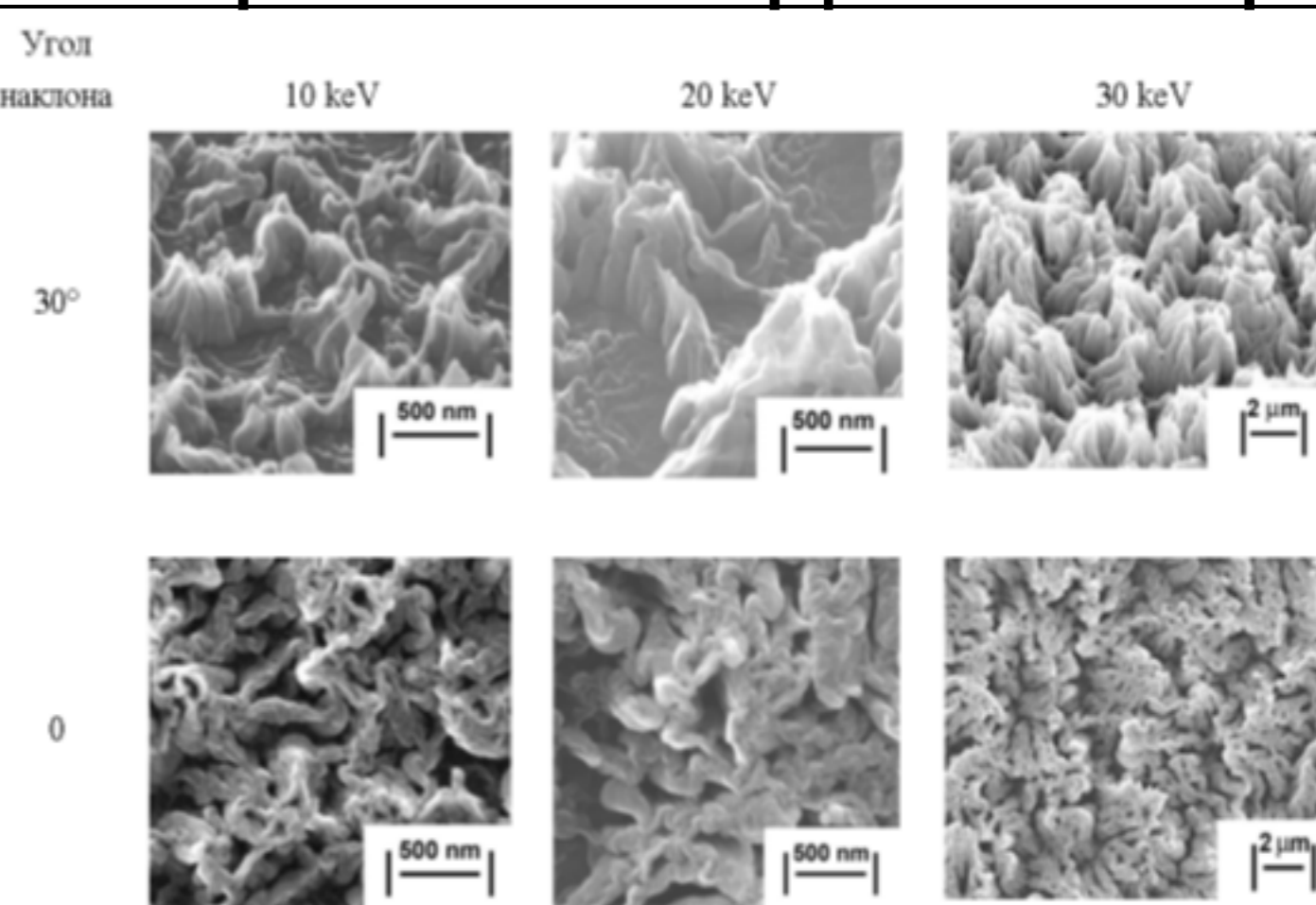
200-600°С

Материал:

Высокоориентированный пиролитический графит (ВОПГ) УПВ-1Т

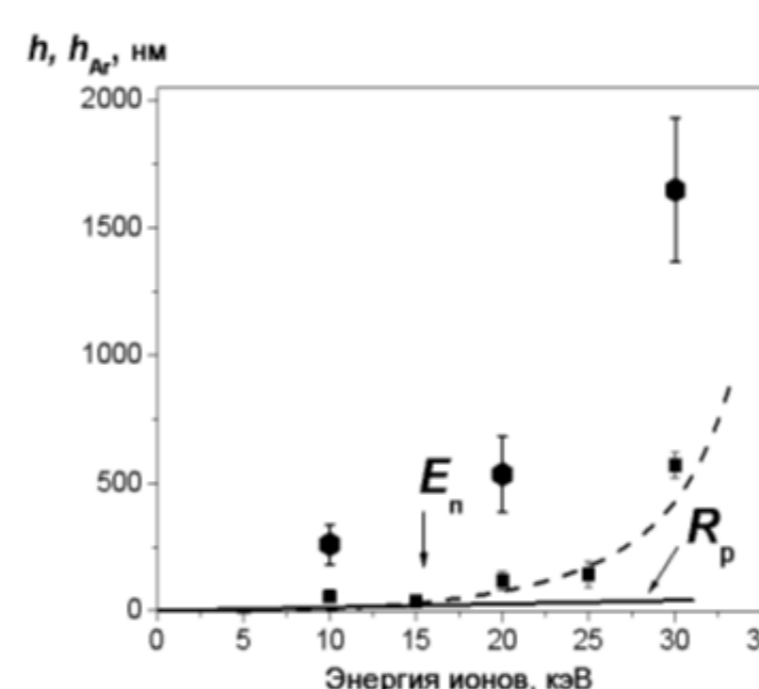
## Результаты

### Влияние энергии ионов на морфологию поверхности



РЭМ-изображения поверхности ВОПГ после облучения ионами Ar<sup>+</sup> с энергиями 10, 20 и 30 кэВ при температуре 250°С. Флуенс облучения  $10^{18} \text{ см}^{-2}$ .

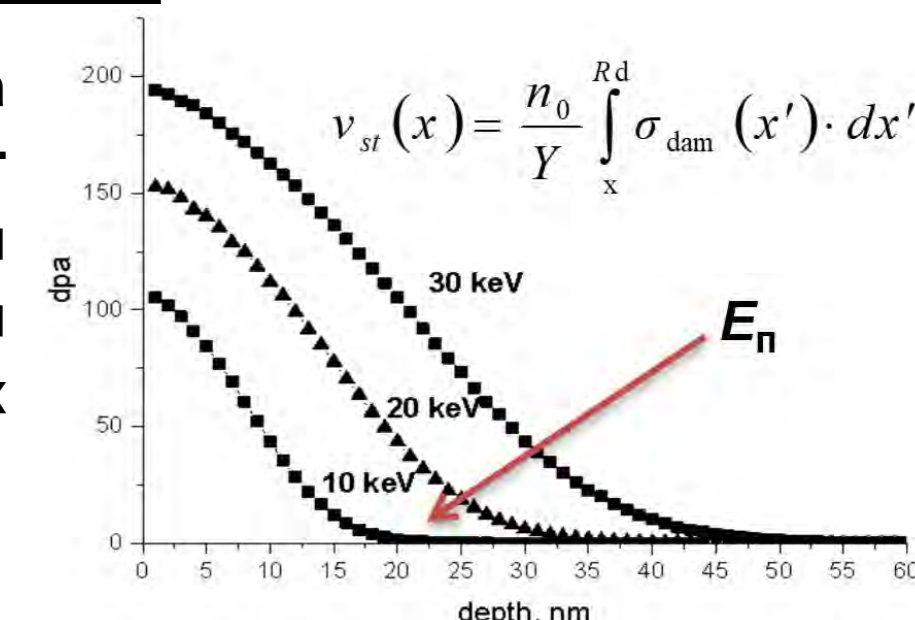
### Зависимость высоты рельефа от энергии ионов



Зависимости высоты морфологических элементов  $h$  на поверхности ВОПГ (гексагоны) и глубины внедрения аргона  $h_{Ar}$  (квадраты) от энергии ионов Ar<sup>+</sup>.  $E_n$  – пороговая энергия эффекта глубокого модифицирования.

### Влияние глубины дефектообразования на тип пластической деформации

Энергетический порог для эффекта глубокой модификации может быть связан с порогом активации механизмов деформации для двумерных материалов по их толщине.



1. Virgil'ev Yu S and Kalyagina I P 2004 *Inorganic Materials* 40 S33–S49.  
 2. Puntakov N A, Begrambekov L B and Grunin A V 2020 *J. Phys.: Conf. Ser.* 1713 012037  
 3. Burchell T 1997 *MRS Bulletin* 22(4) 29–35  
 4. Grigoriev S, Peretyagin P, Smirnov A, et al. 2017 *J. Eur. Ceram. Soc.* 37 2473–79  
 5. Habenicht S, et al. 2000 *Nucl. Instrum. Methods in Phys. Res. B.* 161–163 958–62

6. Liu D, et al. 2021 *Carbon* 173 215–31  
 7. Andrianova, N. N., et al. *Bull. Rus. Acad. Sci.: Phys.*, 2024, V. 88, No. 4, pp. 491–497.  
 8. Andrianova N N, Borisov A M, Mashkova E S, et al. 2013 *Nucl. Instrum. Methods in Phys. Res. B.* 315 117–20.  
 9. Rooney A P, Li Z, Zhao W, et al. 2018 *Nature Communications* 9 3597