

**Аннотация**

Представлены результаты модификации WC-Co образцов импульсным пучком ионов азота (200-300 кэВ, 120 нс) с плотностью энергии 7-8 Дж/см<sup>2</sup>. Получено, что изменение структуры в приповерхностном слое происходит на глубине 20-30 мкм, что значительно превышает пробег ионов в мишени (≈0.4 мкм) и глубину распространения теплового фронта в течение импульса (≈1.5 мкм). Показано, что эффект дальнего действия может быть связан с перезарядкой ионов и формированием быстрых (fast) атомов.

**1. Экспериментальный стенд**

Эксперименты выполнены на ускорителе ТЕМП-6 (200-300 кВ, 120 нс, состав пучка – ионы N<sup>+</sup>).

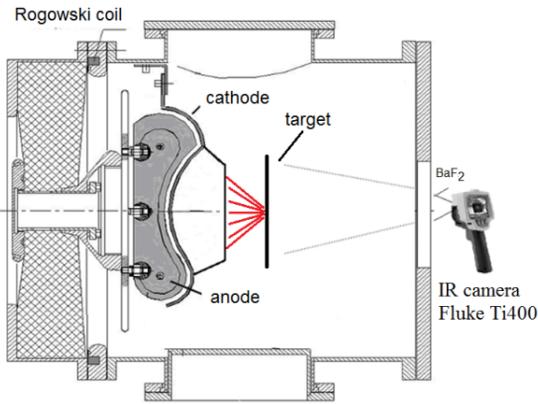


Рис. 1. Схема диодной камеры

**2. Результаты облучения образцов WC-Co**

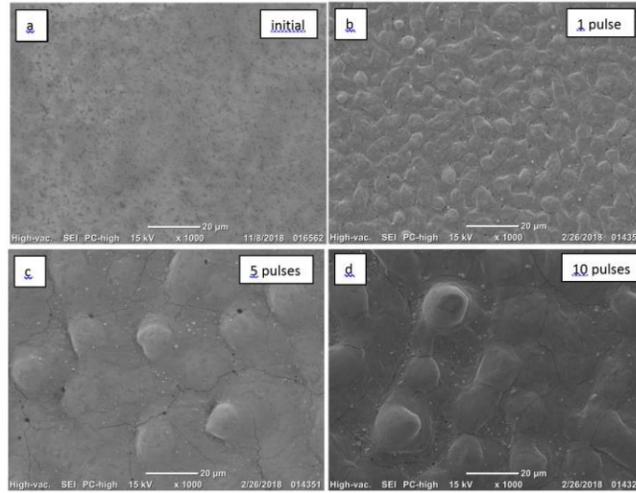


Рис. 3. СЭМ-изображение поверхности образца WC-Co, облученного ионным пучком с плотностью 8 Дж/см<sup>2</sup>

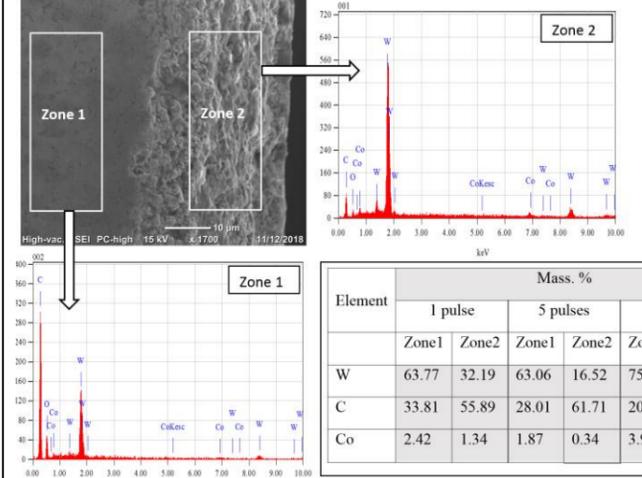


Рис. 4. СЭМ-изображение поперечного сечения облученного образца WC-Co и результаты элементного анализа EDS: зона 1 – необработанный участок, зона 2 – облученный участок.

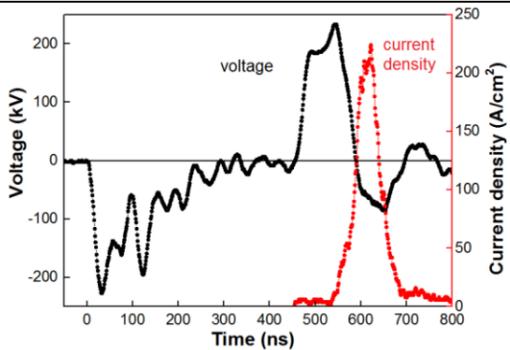


Рис. 2. Осциллограммы ускоряющего напряжения и плотности ионного тока

- Облучение вызвало
- изменение морфологии поверхности
  - поверхностное плавление
  - холмообразную топоологию поверхности

WC-Co (98 wt.% WC and 2 wt.% Co)

Образцы размером 10 мм × 10 мм × 3 мм были предварительно отполированы наждачной бумагой и алмазной пастой.

Изменение структуры в приповерхностном слое происходит на глубине 20-30 мкм, что значительно превышает пробег ионов в мишени (≈0.4 мкм) и глубину распространения теплового фронта в течение импульса (≈1.5 мкм).

Аналогичный эффект дальнего действия обнаружен при облучении керамик на основе ZrO<sub>2</sub> и α-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> непрерывным пучком ионов аргона с энергией 30 кэВ [1] и импульсным пучком ионов углерода (250-300 кэВ, 120 нс) с плотностью энергии 1 Дж/см<sup>2</sup> [2]. [1] S. Ghyngazov, et al. Surface and Coatings Technology. - 2020. - Vol. 388. - Article number 125598. [2] S.A. Ghyngazov, et al. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B. - 2018. - Vol. 434. - P. 120-123

**3. Обсуждение**

**3.1. Плотность энергии импульсного ионного пучка (7-8 Дж/см<sup>2</sup>) не обеспечивает абляцию материала мишени и эффект дальнего действия в образцах WC-Co не может быть обусловлен распространением ударной волны.**

	j, Дж/см <sup>2</sup>
1. Нагрев до температуры плавления 300-3080 К	1.4
2. Плавление	0.4
3. Нагрев до температуры кипения 3080-6300 К	6.1
1-3 вместе	7.9

1. Нагрев от 300 К до 3080 К на глубину 1.45 мкм

$$j = c_1 \cdot \rho \cdot \lambda \cdot \Delta T = 1.4 \text{ Дж} / \text{см}^2$$

2. Плавление

$$j = \eta \cdot \rho \cdot \lambda = 0.4 \text{ Дж} / \text{см}^2$$

3. Нагрев до кипения

$$j = c_2 \cdot \rho \cdot \lambda \cdot \Delta T = 6.1 \text{ Дж} / \text{см}^2$$

**3.2. Модификация образца из WC-Co на глубину 30 мкм не может быть обусловлена формированием ионами первичных радиационных дефектов, их миграцией и последующей аннигиляцией.**

Нагрев модифицированного слоя можно рассчитать по соотношению:

$$\Delta T = K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot \frac{j}{c_v \cdot \rho \cdot \lambda} = 9 \text{ градусов}$$

K<sub>1</sub> – эффективность каскада радиационных дефектов (K<sub>1</sub>≈0.2),

K<sub>2</sub> – доля ядерных потерь иона в карбиде вольфрама (K<sub>2</sub>≈0.1),

K<sub>3</sub> – учет малоуглового рассеяния (K<sub>3</sub>≈0.5),

c<sub>v</sub> – удельная теплоемкость карбида вольфрама

ρ – плотность карбида вольфрама

λ – глубина прогрева мишени

$$\lambda = \sqrt{a \cdot \tau} = \sqrt{8.4 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 / \text{с} \cdot 120 \text{ нс}} = 1 \text{ мкм}$$

При плотности энергии ионного пучка 8 Дж/см<sup>2</sup> и энергии образования первичных радиационных дефектов 40 эВ, количество радиационных дефектов (вакансия +межузельный атом) в мишени равно:

$$N_d = 2 \cdot \frac{j \text{ Дж} / \text{см}^2}{40 \text{ эВ}} = 2.8 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$$

При плотности карбида вольфрама 15.77 г/см<sup>3</sup> и его молярной массе 195.86 г/моль концентрация атомов равна:

$$n_a = \frac{\rho \cdot N_d}{m_m} = \frac{15.77 \cdot 6 \cdot 10^{23}}{195.86} = 4.8 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-3}$$

Количество атомов в модифицированном слое толщиной 30 мкм составит:

$$N_a = 4.8 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-3} \cdot 30 \cdot 10^{-4} \text{ см} = 1.4 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-2}$$

Тогда концентрация радиационных дефектов составит ~20 %.

**3.3. При облучении импульсным ионным пучком в газовом слое молекул остаточного газа, десорбированных с поверхности облучаемого образца, при перезарядке могут формироваться быстрые атомы.**

Вероятность перезарядки иона на молекулах в газовом слое можно рассчитать по соотношению:

$$\beta = l \cdot n_0 \cdot \sigma_{1,0} = n_s \cdot \sigma_{1,0}$$

где l – длина пути иона в газе,

n<sub>0</sub> – концентрация молекул в газовом слое,

σ<sub>1,0</sub> – сечение перезарядки иона,

n<sub>s</sub> – поверхностная плотность адсорбированных молекул, см<sup>-2</sup>.

Реакция	Энергия иона, кэВ	σ, 10 <sup>-16</sup> см <sup>2</sup>	β	
N <sup>+</sup> + N <sub>2</sub> → N <sup>0</sup>	200-300	5.5-9.0	<b>5.5-9.0</b>	[3]
N <sup>+</sup> + O <sub>2</sub> → N <sup>0</sup>	210-300	5.6-7.0	<b>5.6-7.0</b>	[3]

[3] Н.Н. Ло, W.L. Fite // At. Data, 1, 305 (1970)

**3.4. Быстрые атомы расходуют более 60% своей энергии на формирование радиационных дефектов в мишени (ядерные потери).**

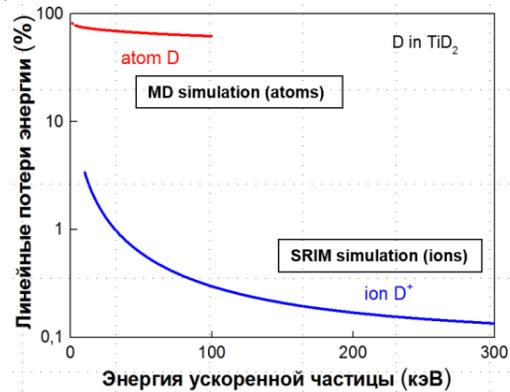


Рис. 5. Зависимость потерь энергии атома дейтерия (1) и дейтрона (2) при поглощении в мишени TiD<sub>2</sub>

В отличие от ионов, быстрые атомы образуют локальные области первичных радиационных дефектов, аннигиляция которых приводит к быстрому нагреву локальной области материала мишени до высокой температуры и последующему формированию ударной волны.

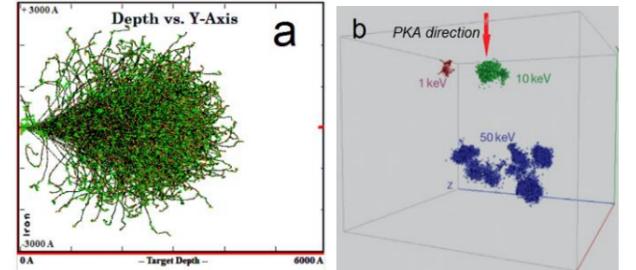


Рис. 6. SRIM моделирование движения ионов N<sup>+</sup> с энергией 250 кэВ в железной мишени (а) и MD-моделирование каскадов радиационных дефектов в железе (б)

**Заключение**

1. Важным процессом, обеспечивающим эффект дальнего действия при облучении образцов из WC-Co, является перезарядка ионов и образование пучка быстрых атомов.
2. Модификация образца из WC-Co на глубину 30 мкм может быть обусловлена формированием быстрыми атомами первичных радиационных дефектов и их миграцией.
3. Значительный вклад в эффект дальнего действия может вносить формирование быстрыми атомами каскадов первичных радиационных дефектов, аннигиляция которых приводит к быстрому нагреву локальной области материала мишени до высокой температуры и последующему формированию ударной волны.