

М.М. Цвентух, В.В. Кулагин  
Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук (ФИАН),  
Москва

Национальный ядерный университет МИФИ, Москва  
elley@list.ru, mmtsv@lebedev.ru

## ОБРАЗОВАНИЕ ПЛАЗМЫ ПРИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ВЗРЫВЕ НАНОВОЛОКОН ВОЛЬФРАМА

Взаимодействие плазмы с поверхностью может приводить к росту наноструктуры волокон вольфрама, содержащих большое количество гелия в виде нанопузырей [1-4]. Развитая наноструктура на поверхности, взаимодействующей с плазмой, облегчает электронную эмиссию с поверхности и электрический взрыв протекающим током крупных – микронных участков поверхности. Импульсно-периодическое зажигание таких взрывов обеспечивает протекание тока самостоятельного (в т.ч. униполярного) дугового разряда.

Нами было показано, что Джоулев нагрев наноструктуры превышает тепловые потери на теплопроводность при плотностях протекающего (эмитируемого) тока выше уровня порядка 1-10 МА/см<sup>2</sup> [5]. При этом было учтено, полученное нами ранее, значение электрического сопротивления наноструктуры, существенно возросшего из-за рассеяния электронов на нанопузырях, внедренного в вольфрам гелия [6], а именно

$$\rho_{1nw} = \frac{m_e}{ne^2} v_2 + \rho_0 \frac{T}{300 \text{ K}} \approx \rho_2 \times \left( 1 + \frac{T}{15 \text{ kK}} \right)$$

$$\rho_{wfl} = \eta^{-\frac{2}{3}} \rho_{1nw}$$

где  $\rho_0 = 5.28 \mu\Omega \text{ cm}$ ,  $\rho_2 = 0.265 \text{ m}\Omega \text{ cm}$  – вычисленное сопротивление единичного нановолокна,  $\eta$  – средняя плотность нановолокон. Величины  $\eta = 1/20$  для «толстых» - микронных слоев нановолокон,  $\eta = 1/2$  для наших новых экспериментов в чистой гелиевой плазме [8]. Зависимость величины  $\eta$  от высоты слоя нановолокон может быть аппроксимирована как  $\eta \approx \left( 1 + \frac{7x}{2 \mu\text{m}} \right)^{-5/4}$  [2,7].

Для роста температуры в пренебрежении тепловыми потерями

$$C\eta^{5/3} \frac{\partial T}{\partial t} = \rho_{1nw} j^2$$

можно получить зависимость

$$T(t) = -15 \text{ kK} + (15 \text{ kK} + 300 \text{ K}) \exp\left(\frac{\rho_0 j^2}{C\eta^{5/3} 300 \text{ K}} t\right)$$

Величина «интеграла действия электрического тока» для наноструктуры волокон

$$C\eta^{\frac{5}{3}} \frac{300 \text{ K}}{\rho_0} \ln \frac{T_{cr} + 15 \text{ kK}}{15 \text{ kK} + 300 \text{ K}} = j^2 \tau \equiv h$$

которая для  $\eta = \frac{1}{2}$  составляет  $3.78 \times 10^7 \text{ A}^2 \text{ см}^4 \text{ с}$ . Для плотности тока в эксперименте [8]  $80 \text{ MA/см}^2$  время образования плазмы можно оценить, как  $\tau = h/j^2 = 5.9 \text{ нс}$ , и соответствующая скорость «движения» ячеек катодного пятна  $d/\tau = 340 \text{ м/с}$ .

Методами молекулярной динамики был промоделирован нагрев нановолокон, соответствующий Джоулеву энерговыделению с учетом вычисленного электрического сопротивления.

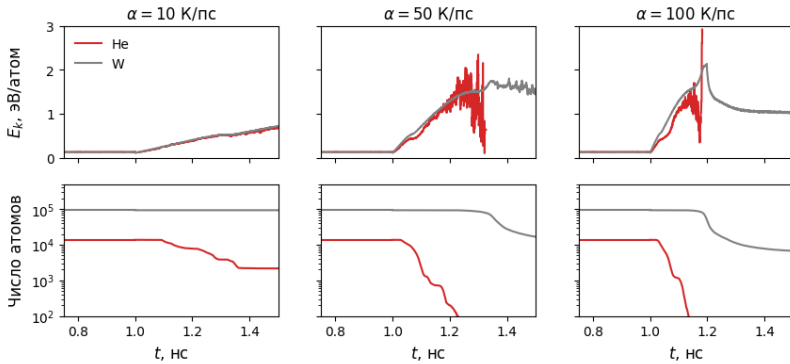


Рисунок 1. Временные зависимости средней кинетической энергии атомов вольфрама и гелия (вверху) и их количества в наноструктуре вольфрама при различных значениях скорости нагрева структуры

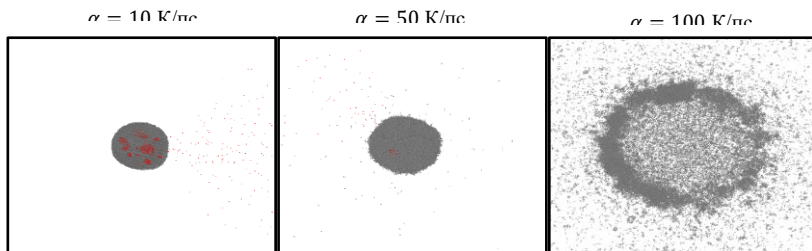


Рисунок 2. Вид сверху на наноструктуру вольфрама при  $t = 1.17$  нс и различных значениях скорости нагрева

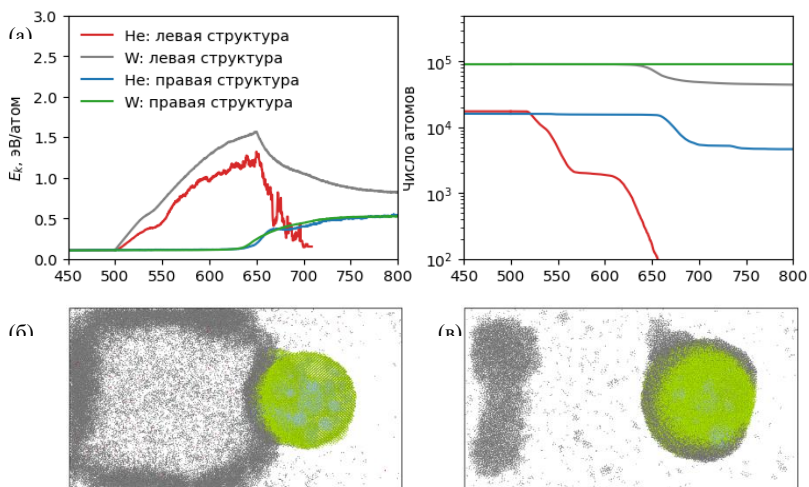


Рисунок 3. (а) временные зависимости средней кинетической энергии и числа атомов вольфрама и гелия в обеих наноструктурах. (б) и (в) – вид сверху на систему в моменты времени  $t = 650$  пс и  $t = 750$  пс

Для формулы Зельдовича-Райзера [9] для среднего заряда ионов вольфрама можно записать приближенную аппроксимацию (см. рис. 4)

$$Z = T \times [1 - (\lg n - 20)/5] / \text{эВ}$$

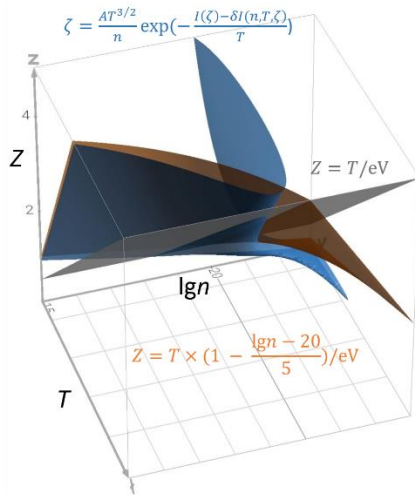


Рисунок 4. Формула Зельдовича-Райзера для среднего заряда ионов в слабейдеальной плазме, и приближенные аппроксимации

Работа поддержана РФФ, грант № 22-12-00274-П.

- [1] Shin Kajita *et al* 2009 *Nucl. Fusion* **49** 095005
- [2] D. Nishijima, M. Baldwin, R. Doerner, J. Yu, 2011 *J. Nucl. Mater.* **415(1)** S96
- [3] Yu. Gasparyan, V. Efimov, and K. Bystrov, 2016 *Nucl. Fusion* **56**, 054002.
- [4] Shin Kajita, Shuichi Takamura and Noriyasu Ohno 2009 *Nucl. Fusion* **49** 032002
- [5] Tsventoukh 2025 *Physics of Plasmas* **32**, 052502
- [6] Tsventoukh M.M., Kulagin V.V. 2024 *Phys. Plasmas* **31** 092509  
<https://pubs.aip.org/aip/pop/article/31/9/092509/3313710/Impact-of-helium-nanobubbles-on-tungsten-fuzz>
- [7] M. M. Tsventoukh, 2023 *Phys. Plasmas* **30**, 092511
- [8] A. V. Kaziev *et al* 2025 *Physics of Plasmas* **32** 043503
- [9] Y. B. Zeldovich and Y. P. Rayzer, *Physics of Shock Waves and High Temperature Hydrodynamic Phenomena*. New York: Academic, 1967