

Динамика волновых процессов сжатия и расширения в паллади при пикосекундном лазерном воздействии

И. А. Стучебрюхов^{1,2}, С. А. Абросимов¹, А. Ю. Семенов^{1,3},
К. В. Хищенко^{4,3,5,6,*}

¹Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва, Россия

²Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, Россия

³Московский физико-технический институт, Долгопрудный, Россия

⁴Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия

⁵Южно-Уральский государственный университет, Челябинск

⁶Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и
медицинской химии РАН, Черноголовка, Россия

**konst@ihed.ras.ru*

Dynamics of wave processes of compression and expansion in **palladium** under picosecond laser irradiation

I. A. Stuchebryukhov^{1,2}, **S. A. Abrosimov**¹, **A. Yu. Semenov**^{1,3},
K. V. Khishchenko^{4,3,5,6,*}

¹Prokhorov General Physics Institute RAS, Moscow, Russia

²Lebedev Physical Institute RAS, Moscow, Russia

³Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, Russia

⁴Joint Institute for High Temperatures RAS, Moscow, Russia

⁵South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

⁶Federal Research Center of Problems of Chemical Physics and Medicinal
Chemistry RAS, Chernogolovka, Russia

**konst@ihed.ras.ru*

Dedication



The authors dedicate this article to the memory of their teacher, colleague and friend **Igor Kornelievich Krasnyuk (07.03.1942–26.05.2020)**.

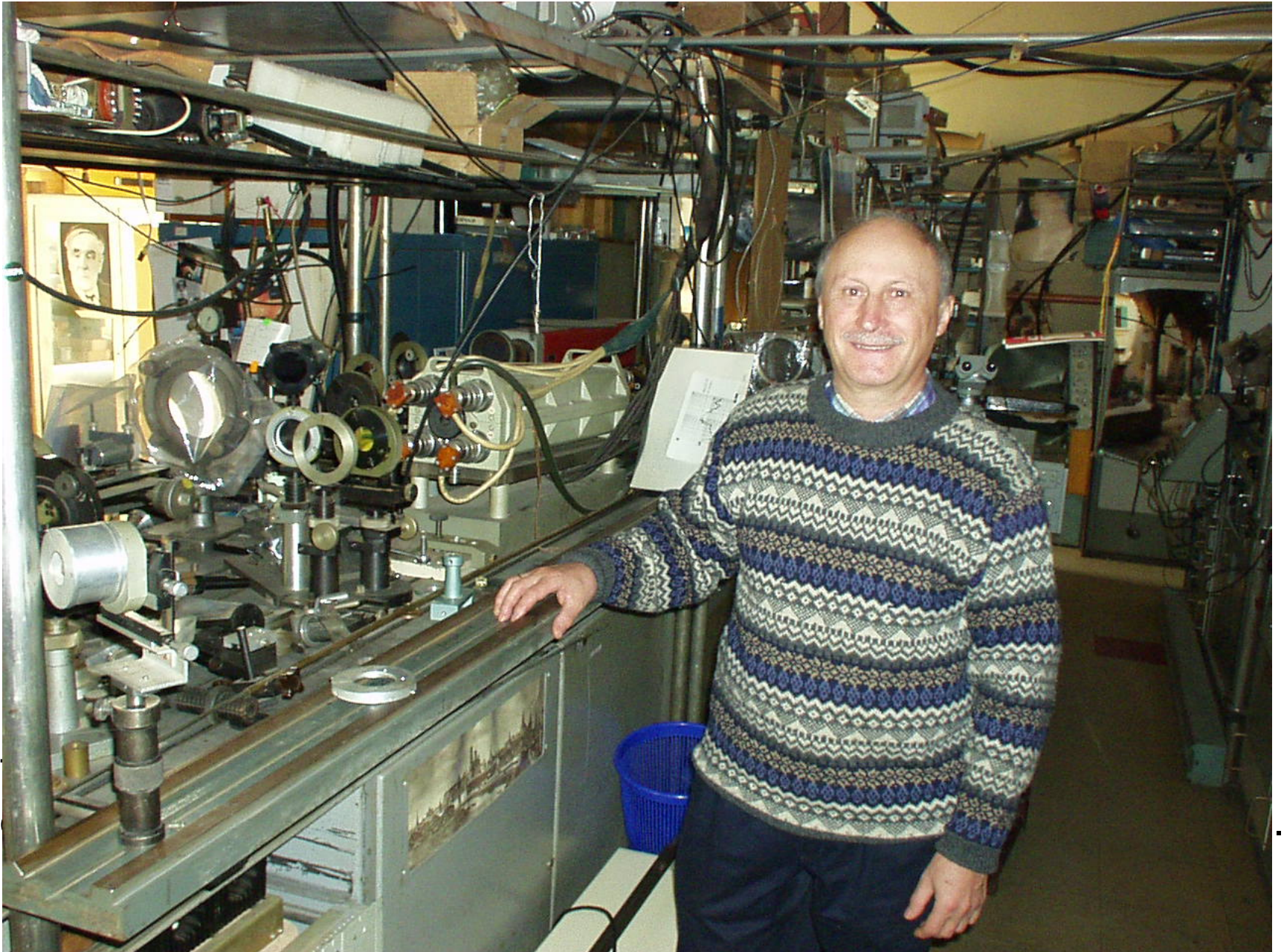
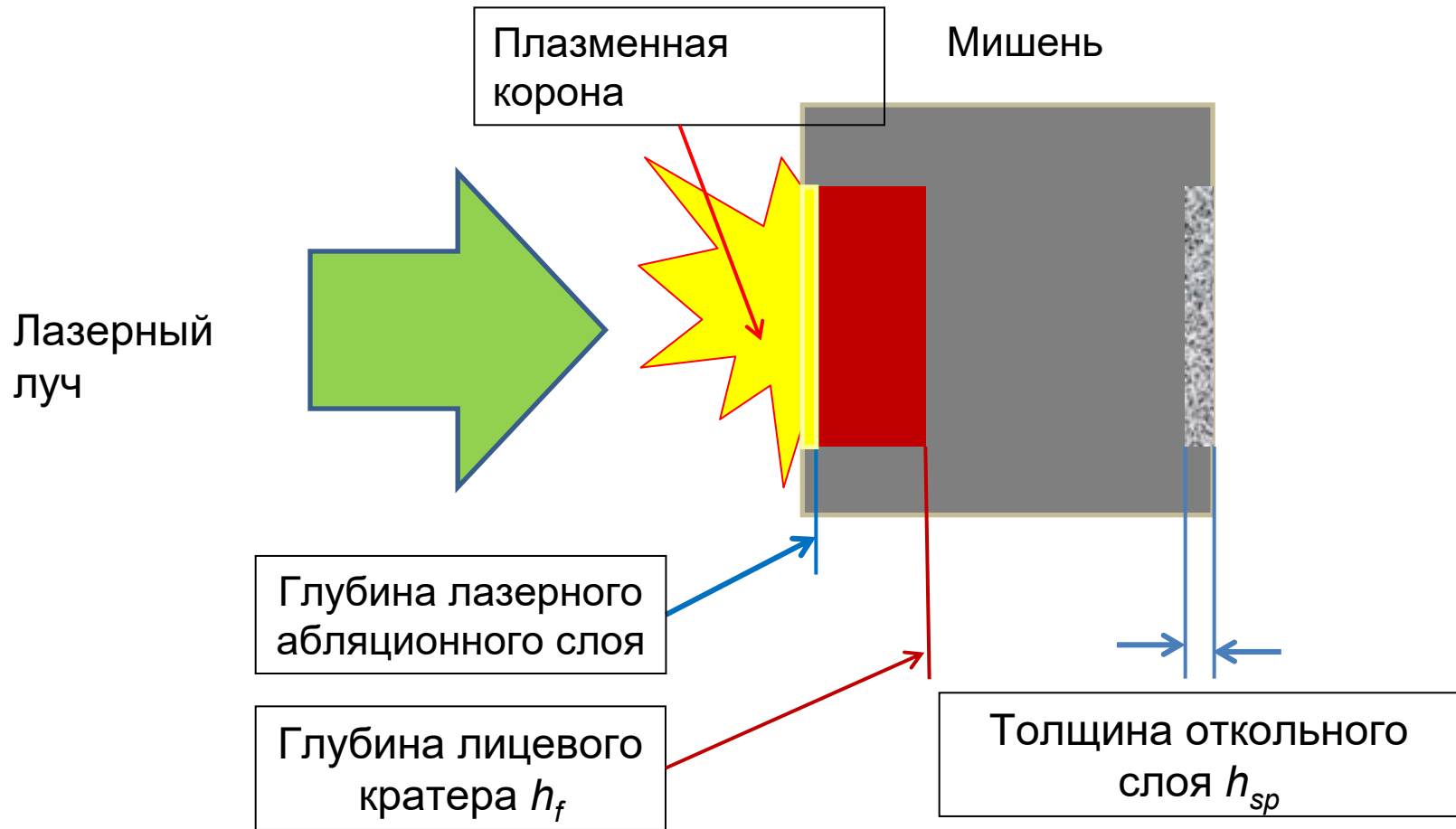


Схема экспериментов



Условия экспериментов

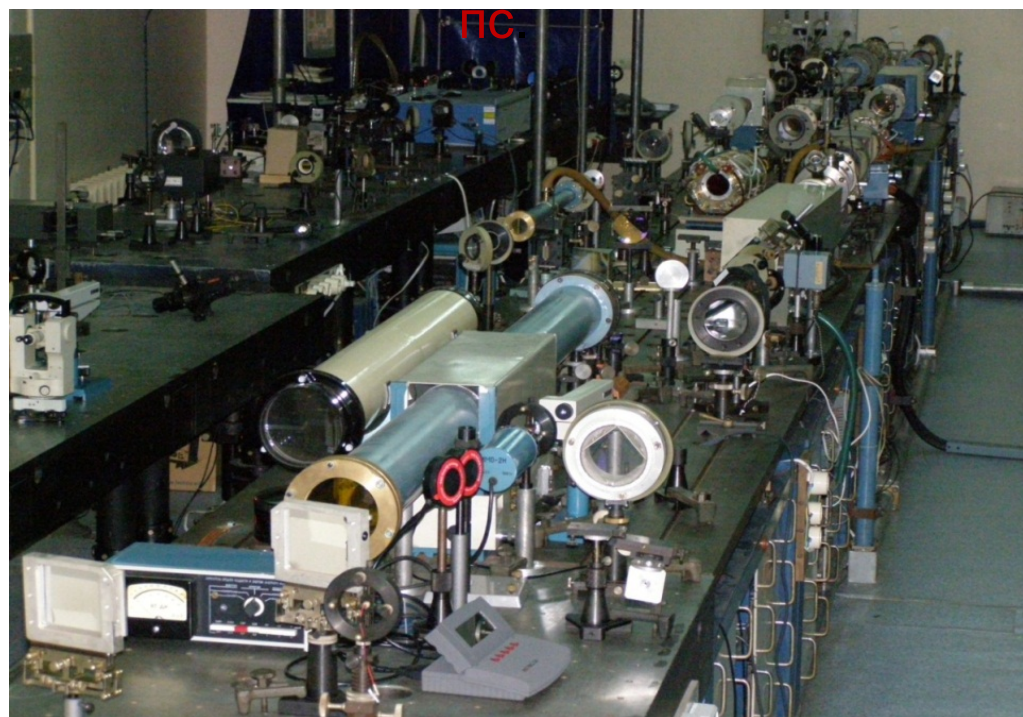
Характеристики лазерного импульса: длина волны – 0.527 мкм (вторая гармоника), длительность – 70 пс, энергия – от 0.5 до 1.5 Дж.

Выходной лазерный пучок диаметром 75 мм фокусировался двухкомпонентным объективом на мишени в пятна диаметром от 0.4 до 1.5 мм. Распределение интенсивности лазерного излучения в области фокусировки было близким к равномерному. Максимальная величина плотности потока лазерного излучения на мишени достигала величины 15 ТВт/см², давление – 0.8 ТПа.

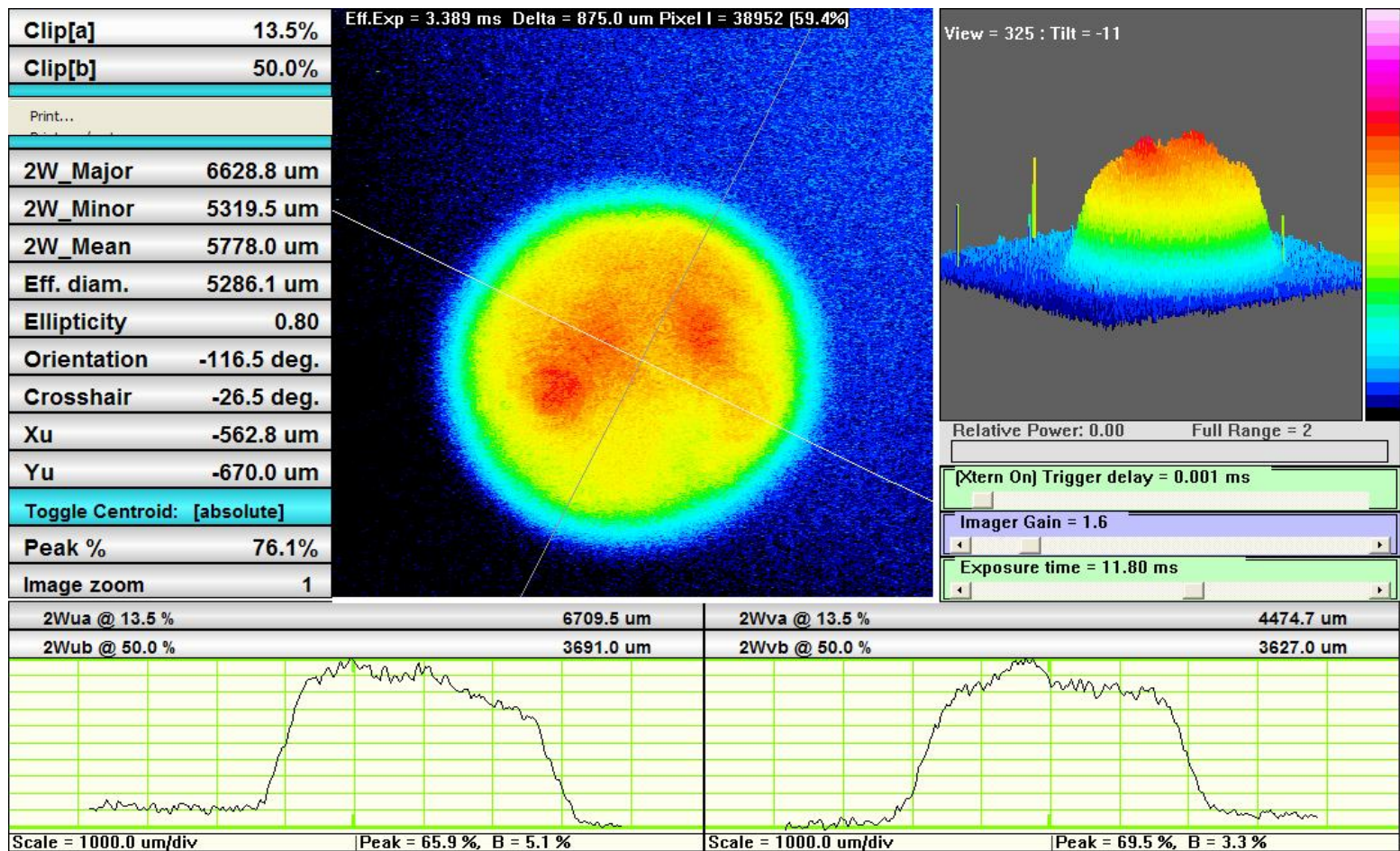
Мишени представляли собой фольги из исследуемых материалов с толщинами: Al - 100 и 1200 мкм, Pd – 100 мкм, Pb – 90 мкм.

Лазерная установка «Камертон-Т» (ИОФ РАН)

Длина волны излучения (вторая гармоника) - **0.527 мкм**, максимальная энергия в импульсе до **5 Дж**, длительность импульса излучения - **70**

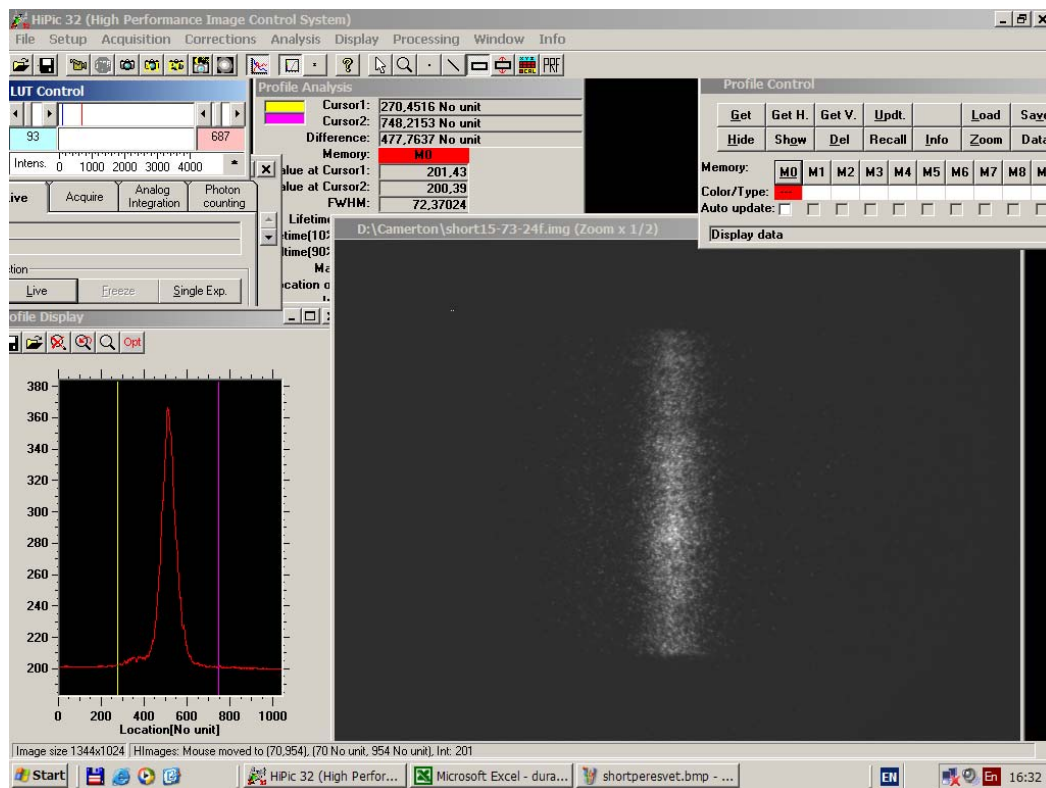


Распределение интенсивности в поперечном сечении лазерного пучка в ближней зоне



Измерение длительности лазерного импульса

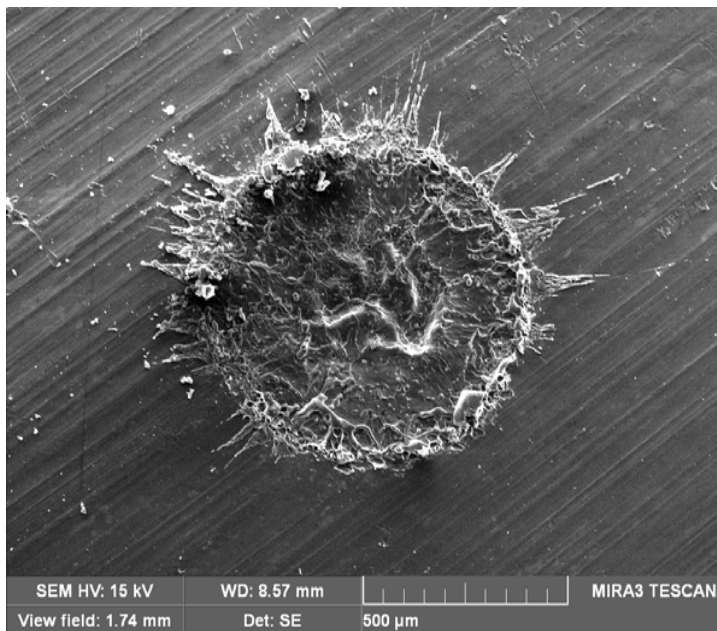
(Электронно-оптическая камера с разрешением 1.5 пс)



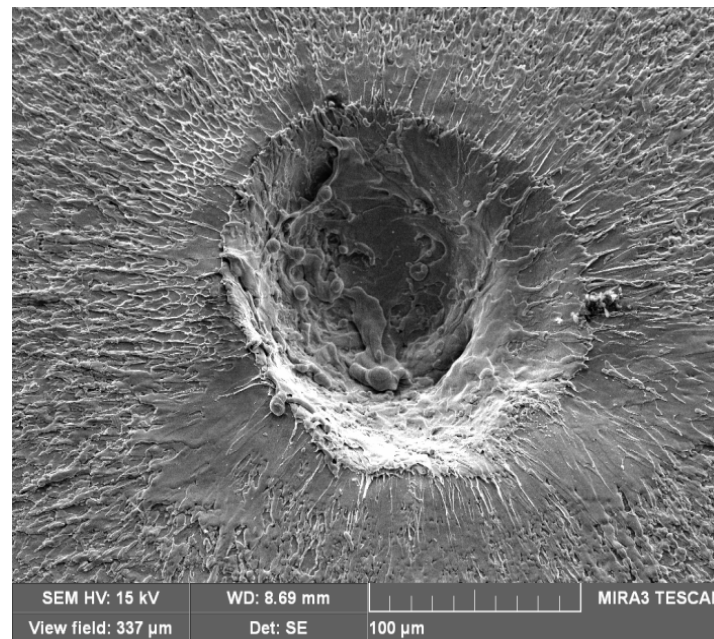
Экспериментальная форма импульса давления на лицевой поверхности мишени аппроксимируется формулой:

$$\frac{P}{P_0} = 16 \exp\left(-\frac{(t-t_0)^2}{\tau^2}\right) \quad \tau = 70 \text{ ps} \quad t_0 = 100 \text{ ps}$$

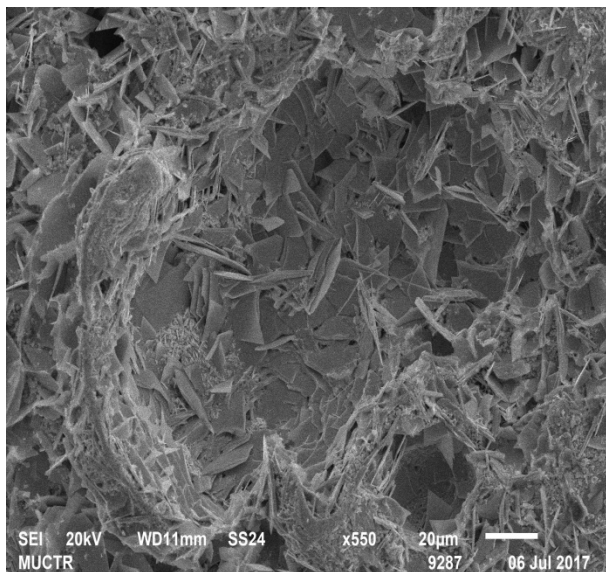
Фотографии лицевых поверхностей мишеней, полученные с помощью сканирующего электронного микроскопа



Алюминий

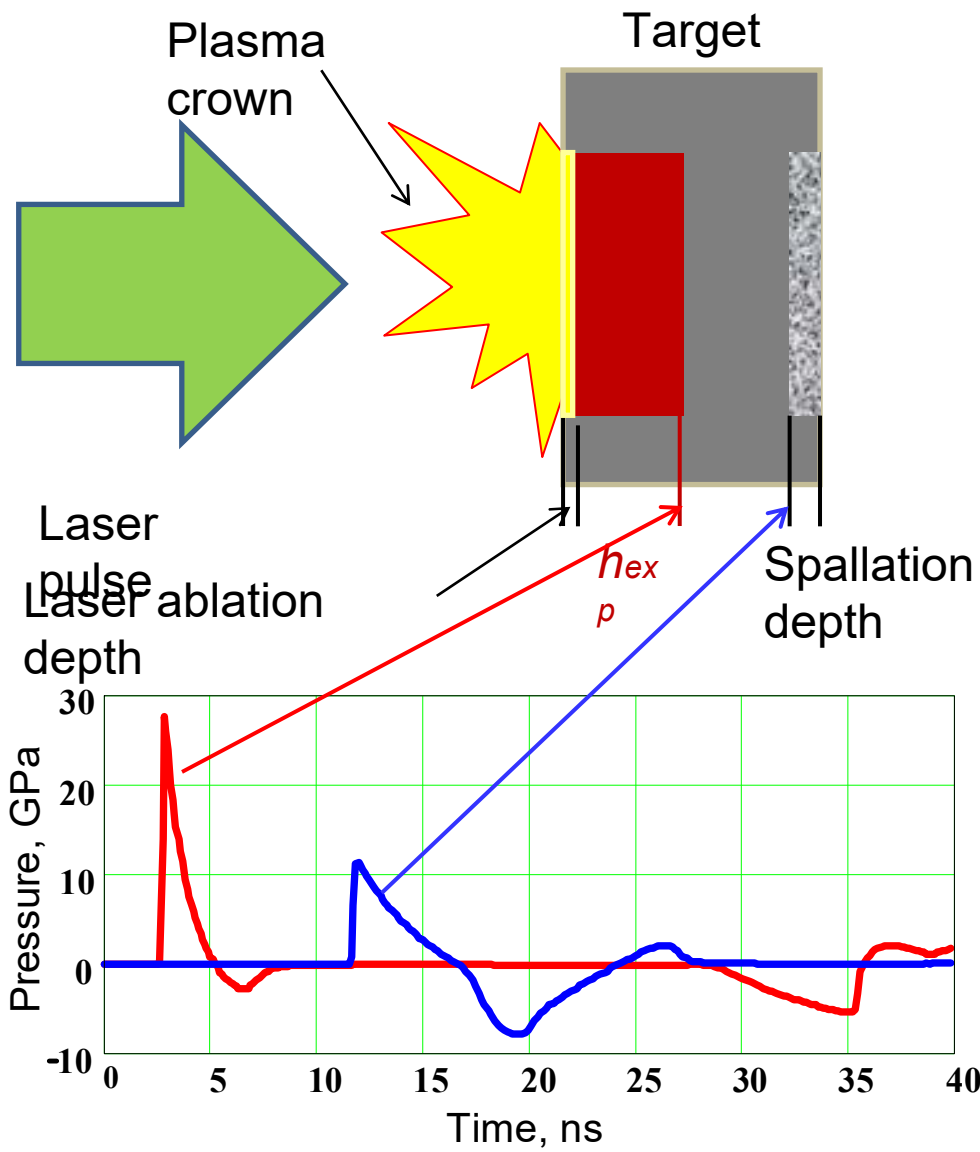


Палладий



Свинец

Scheme of impact of the laser pulse on the target



Calculated history of pressure on face cavity depth (red line) and on spallation depth (blue line) for aluminum target.

Experimental conditions

The experiment was carried out on a Kamerton-T facility based on a neodymium glass laser (wavelength $\lambda = 0.527 \mu\text{m}$).

A pulse with duration $\tau = 70 \text{ ps}$ and energy $E_l = 1.164 \text{ J}$ was focused into a spot 0.414 mm in diameter on the surface of a $90\text{-}\mu\text{m}$ -thick palladium target.

Taking into account the measured dependence of the laser radiation intensity on time, the maximum intensity of this pulse is estimated to be $I_0 = 11.08 \text{ TW/cm}^2$.

The result of the action of such a pulse is the formation of a spall of a part of the material on the rear side of the target.

The spall occurred at a distance of $12 \pm 1 \mu\text{m}$ from the rear surface; the diameter of the spalled plate is 0.46 mm .

Модель уравнения состояния в калорической форме $E = E(V, P)$ или $P = P(V, E)$

Общий вид

$$P(V, E) = P_c(V) + \frac{\Gamma(V, E)}{V} (E - E_c(V))$$

Упругая компонента (при $T = 0$ К)

$$E_c(V) = \frac{B_{0c} V_{0c}}{m - n} (\sigma_c^m / m - \sigma_c^n / n) + E_d$$

$$\sigma_c = V_{0c} / V$$

при $V = V_{0c}$: $E_c(V_{0c}) = 0$

$$E_d = B_{0c} V_{0c} / mn$$

$$P_c(V_{0c}) = -dE_c/dV = 0$$

$$B_c(V_{0c}) = -VdP_c/dV = B_{0c}$$

$$B'_c(V_{0c}) = dB_c/dP_c = B'_{0c}$$

Модель уравнения состояния в калорической форме $E = E(V, P)$ или $P = P(V, E)$

Общий вид

$$P(V, E) = P_c(V) + \frac{\Gamma(V, E)}{V} (E - E_c(V))$$

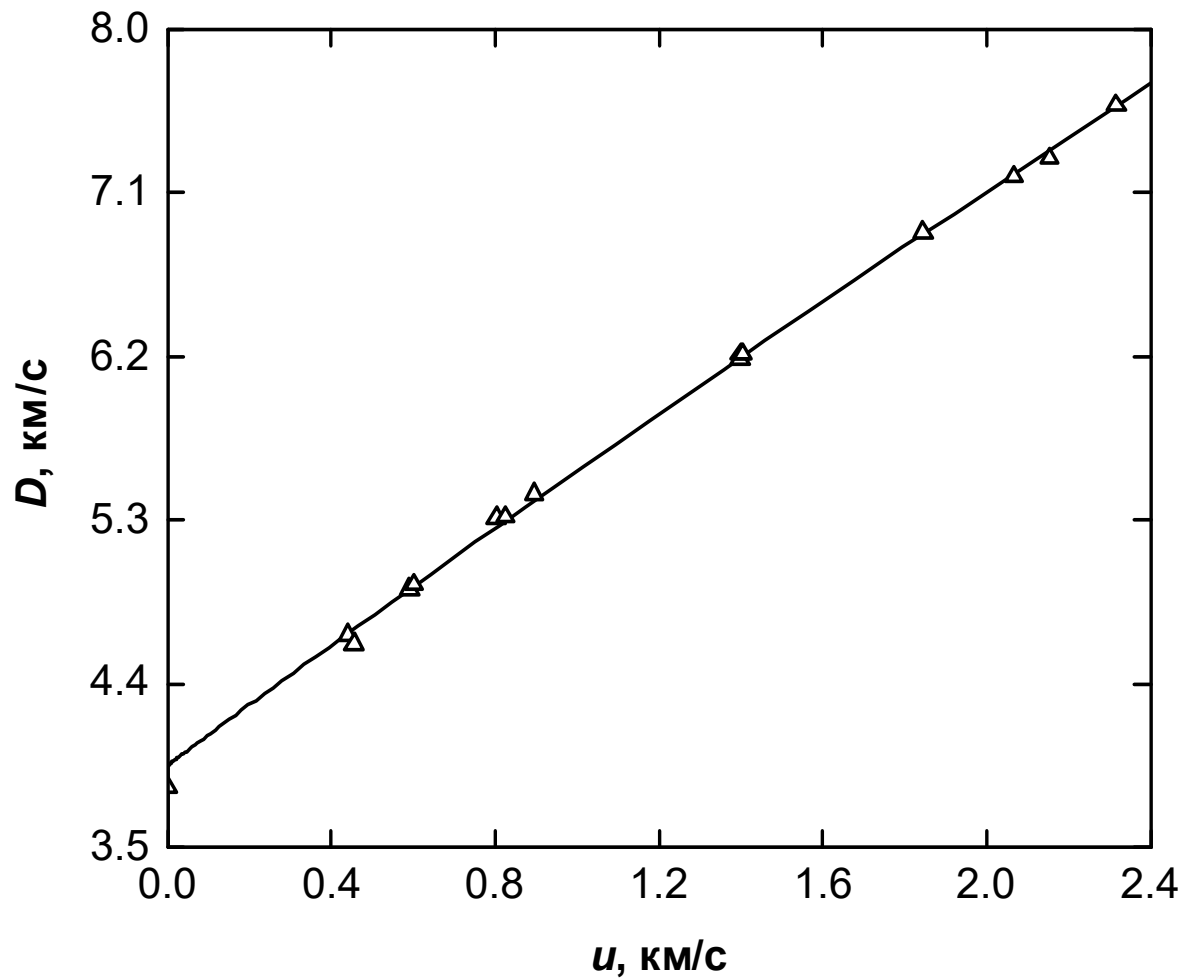
Тепловая компонента

$$\Gamma(V, E) = \gamma_i + \frac{\gamma_c(V) - \gamma_i}{1 + \sigma_c^{-2/3} (E - E_c(V)) / E_a}$$

$$\gamma_c(V) = 2/3 + (\gamma_{0c} - 2/3) \frac{\sigma_n^2 + \ln^2 \sigma_m}{\sigma_n^2 + \ln^2(\sigma / \sigma_m)}$$

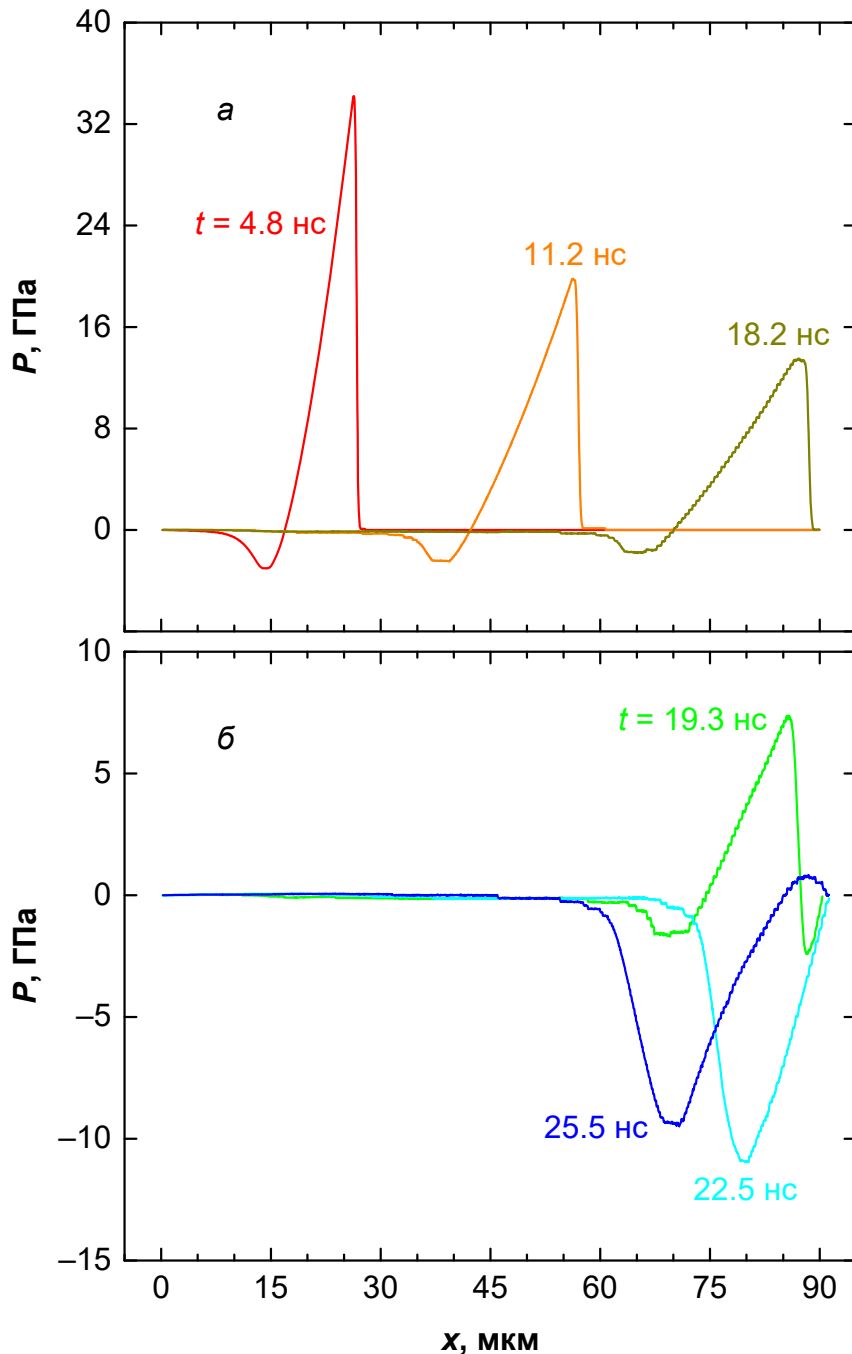
$$\sigma = V_0 / V$$

Palladium Hugoniot



Pressure in the target at $t = 4.8$, 11.2, 18.2 (**a**), 19.3, 22.5 and 25.5 ns (**b**)

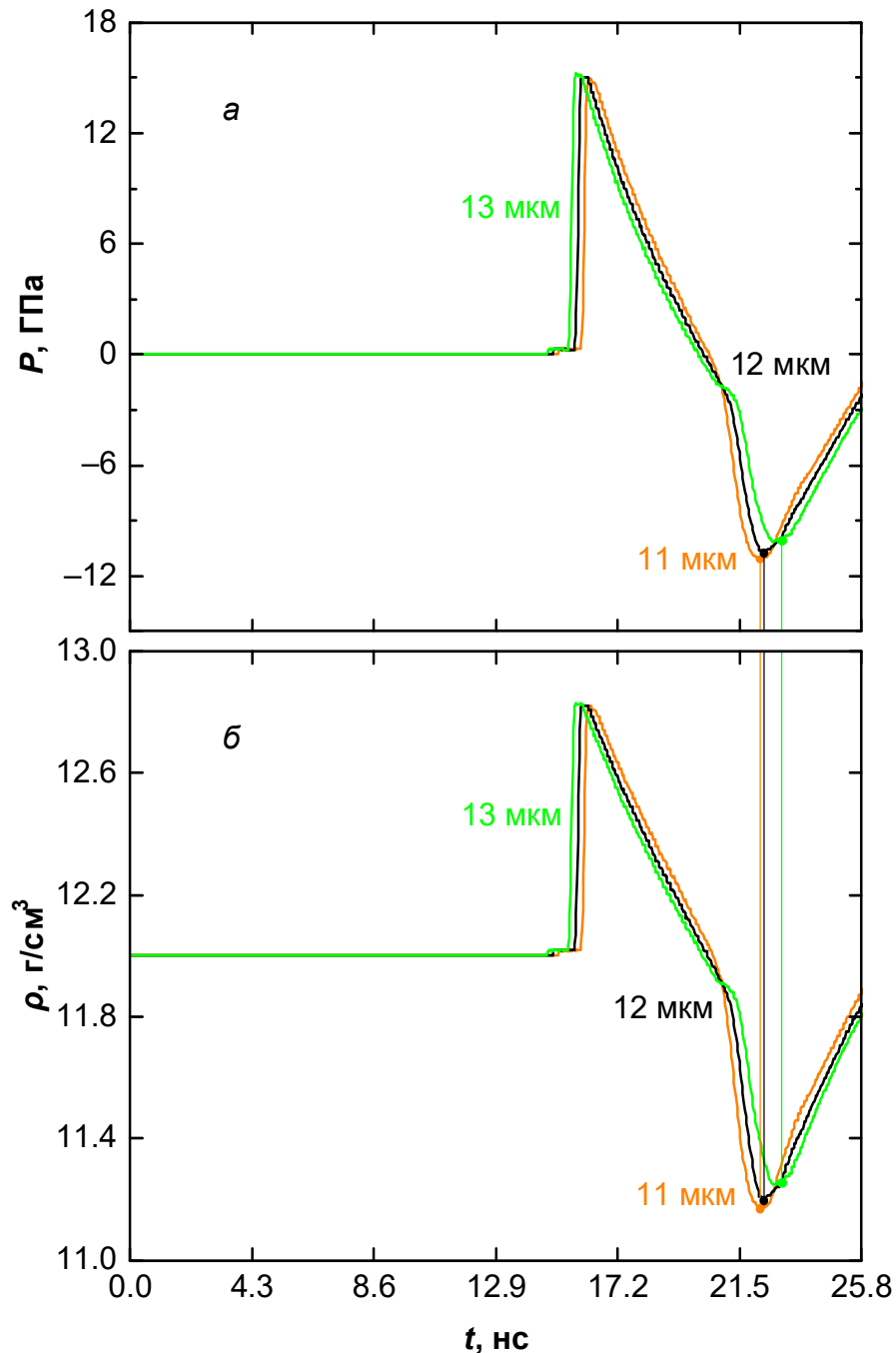
along the coordinate axis x , which is perpendicular to the irradiated surface, with the origin at the point of the initial position of this surface before the experiment.



Pressure (*a*) and density (*b*) histories

in three planes that correspond to the initial distances from the back of the target 11, 12 and 13 μm .

The thin vertical lines correspond to the moments of reaching the maximum tensile stress (negative pressure).



Conclusions

- Thus, in a laboratory experiment on irradiating a 90- μm -thick **palladium** plate with a 70 ps laser pulse with a maximum intensity of 11.08 TW/cm², a spall was obtained at a distance of $12 \pm 1 \mu\text{m}$ from the rear surface of the target.
- A hydrodynamic model including the equation of state for **palladium** have been developed for the propagation and interaction of shock and release waves in a target under such a pulsed action.
- As a result of the calculation using the developed model, the maximum possible tensile stress in the sample in the spall plane is determined as **$10.7 \pm 0.5 \text{ GPa}$** and the maximum strain rate at the stage of tension at negative pressures is determined as **$92 \pm 7 \mu\text{s}^{-1}$** .

Semenov A.Yu., Stuchebryukhov I.A., Khishchenko K.V. Modeling of shock-wave processes in aluminum under the action of a short laser pulse // Math. Montis. 2021. V. 50. P. 108–118.

Спасибо