

Two-temperature warm dense matter transient states created by ultrashort optical or X-ray pulse

*S.I. Anisimov¹, N.A. Inogamov¹, V.A. Khokhlov¹, Yu.V. Petrov¹,
V.V. Zhakhovsky^{2,3}, M.B. Agranat², S.I. Ashitkov², A.Ya. Faenov^{2,4},
P.S. Komarov², I.Yu. Skobelev², V.V. Shepelev⁵*

¹ Landau Institute for Theoretical Physics, Chernogolovka,

² Joint Institute for High Temperatures, Moscow,

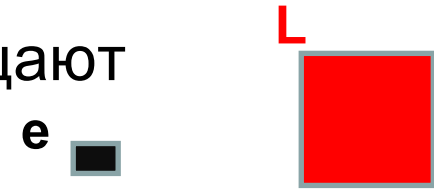
³ Department of Physics, University of South Florida, Tampa,
Florida, USA,

⁴ Kansai Photon Science Institute, JAEA, Kyoto, Japan

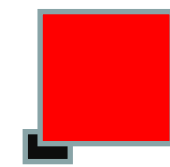
⁵ Institute for Computer Aided Design, Moscow

Двухтемпературность

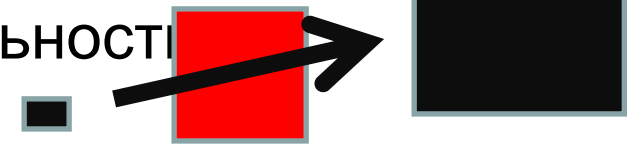
- Энергию электромагнитного излучения поглощают электроны
- Передача энергии из электронов в ионы занимает достаточно продолжительный промежуток времени
- Действительно, характерное электронное время a/v_F порядка 1 фс, а энергообмен в электрон-ионных столкновениях длится в M_i/m_e раз дольше и поэтому затягивается на пикосекунды
- С этим временем энергообмена t_{ei} связана стадия электрон-ионной релаксации, когда температуры T_e и T_i электронной и ионной подсистем разные – таков смысл двухтемпературности
- Такое имеет место, если продолжительность лазерного импульса t_L короче t_{ei}



t_L

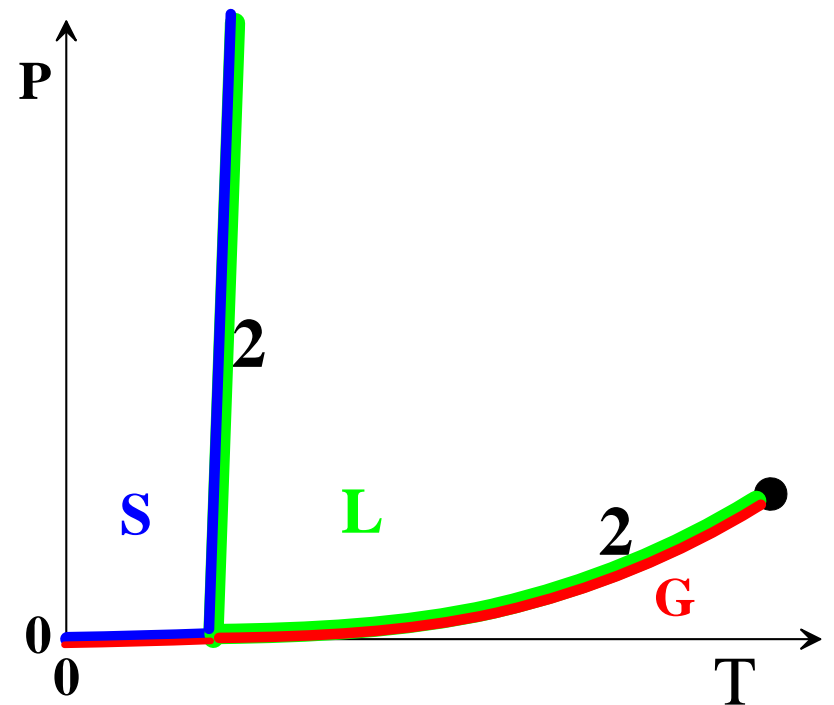
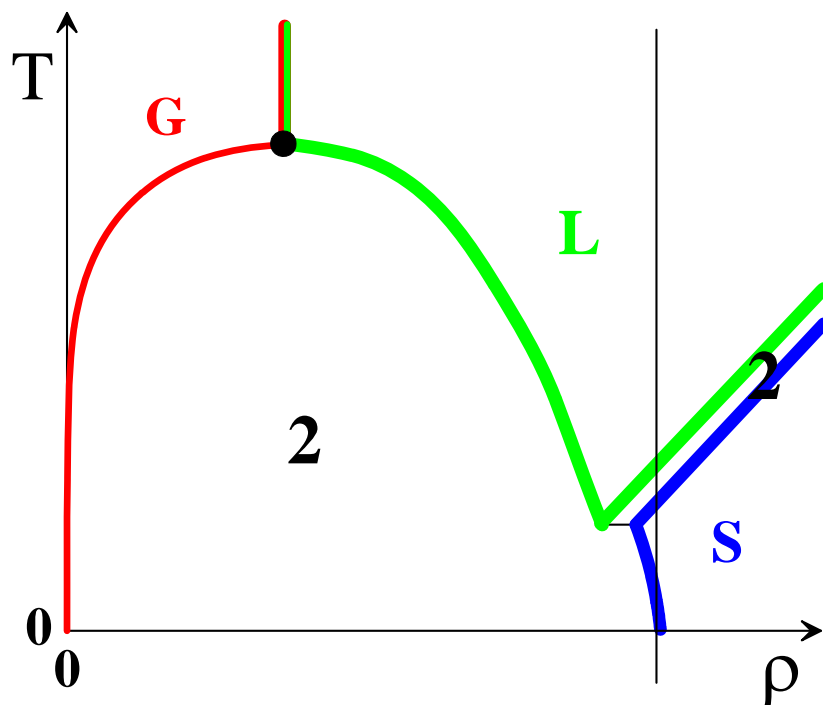


t_{ei}



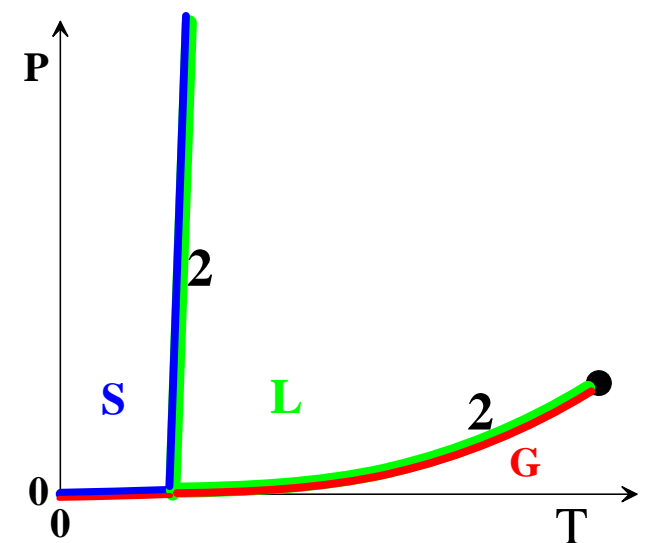
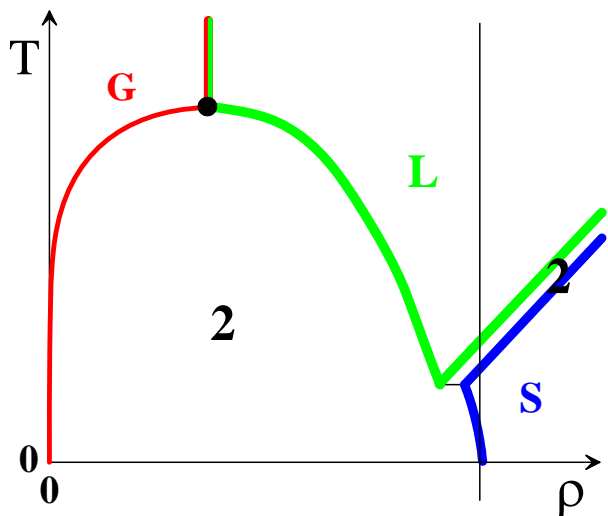
WDM = Warm Dense Matter: характеристика амплитуды воздействия

- WDM– где это? : $n \sim n_{\text{solid state}}$, $E \sim \text{atomic}$
- Тогда когезионные свойства конденсированной фазы существенны
- Место старта (перед воздействием лазера) = твердое тело при комнатной температуре
- Лазерные энергозатраты таковы, что может иметь место плавление



Амплитуда энерговложений в электронную подсистему

- WDM – это термин, означающий, что (1) среда плотная и что (2) энергии порядка эВ
- Закон сохранения энергии при передаче энергии из электронов в ионы (нет радиационных потерь)
- Поэтому энерговложения в электронную подсистему таковы, что в металлах энергии электронов порядка **фермиевских**, ε в полупроводниках и диэлектриках степени ионизации Z на двухтемпературной стадии **~1-100%**



Значение двухтемпературной стадии

- При рассматриваемых энергиях лазерное воздействие вызывает гидродинамическое движение в облученной мишени
- Имеется двухтемпературная гидродинамическая стадия, когда существенно электронное давление
- Кроме того, на двухтемпературной стадии складывается распределение температур и давлений, которое потом определяет движение на однотемпературной стадии $T_e = T_i$
- Выше была представлена терминология **WDM**, **двухтемпературность**. Она относится к продолжительности и амплитуде переходных процессов: лазерное воздействие t_L , двухтемпературная релаксация t_{ei} ; температуры порядка энергии Ферми в металлах и ширины запрещенной зоны в полупроводниках и изоляторах

Лазеры

- Длительность импульса $t_L < t_{ei}$, это означает порядка и короче пикосекунды
- Имеется широкий диапазон длительностей t_L от порядка пс до значений t_L , которые намного короче пс (несколько фс)
- Энергия кванта: от ИК до рентгена

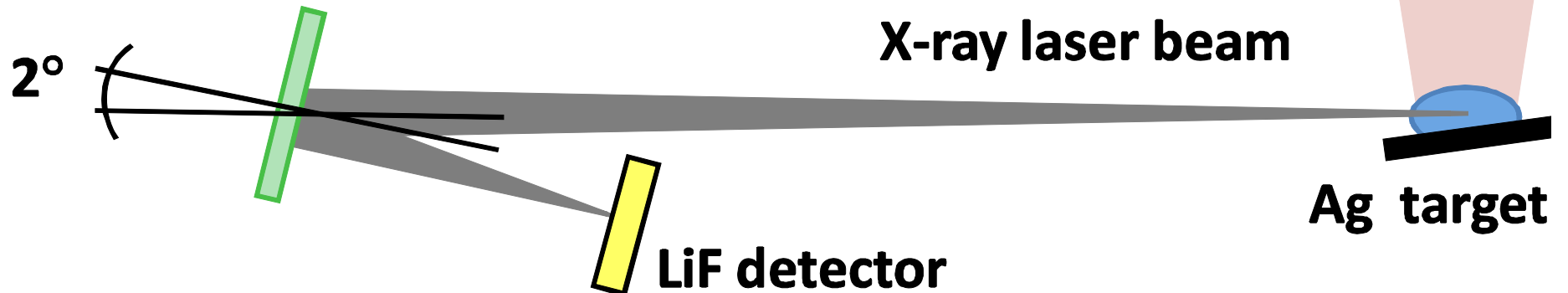
X-ray lasers

- (1) Transient-collisional scheme
 - (2) Oscillations of free relativistic electron beam: X-ray free electron laser (XFEL)
 - (3) High order harmonic generation at a target surface by femtosecond optical laser at relativistic intensities
-
- Below the ablations by very **different** lasers (1) and (2) are compared
 - Ablation thresholds are **similar** !
 - XFEL allow us to consider a **wide range** of intensities in one set of experiments: fluencies from 10 to 300 mJ/cm² – variation of physics from **warm to hot** case

Transient-collisional X-ray laser

- Ag XRL:
- $\tau_L = 7$ ps
- $\lambda/E_{h\nu} = 14\text{nm}/89.3\text{eV}$
- $F/I = 10\text{mJ}/\text{cm}^2 / (1-2)\text{GW}/\text{cm}^2$

**Mo/Si multilayer
spherical mirror (f = 525 mm)**



Transient-collisional X-ray laser (upgraded)

Faenov, Inogamov et al., Appl.Phys.Lett., 2009; Inogamov, Faenov et al., Cont.Plasma Phys., 2009

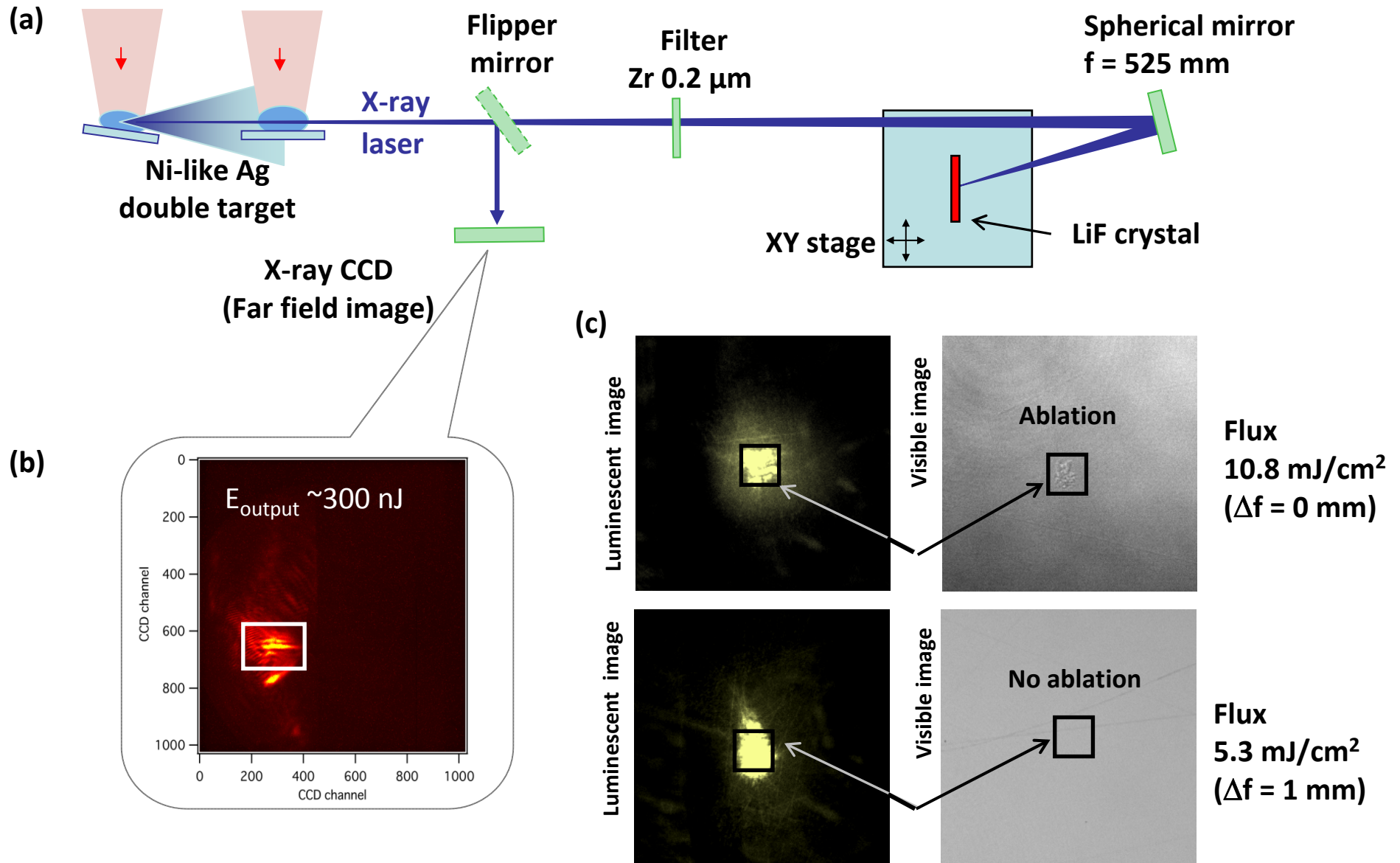


Fig. 1

XFEL RIKEN, SPring-8, Hyogo, Japan

- $\tau_L = 100\text{-}300\text{ fs}$
- $E_{h\nu} = 20.2\text{ eV}$
- $F / I = (10\text{-}300)\text{ mJ/cm}^2 / I\text{ up to }10^{12}\text{ W/cm}^2$



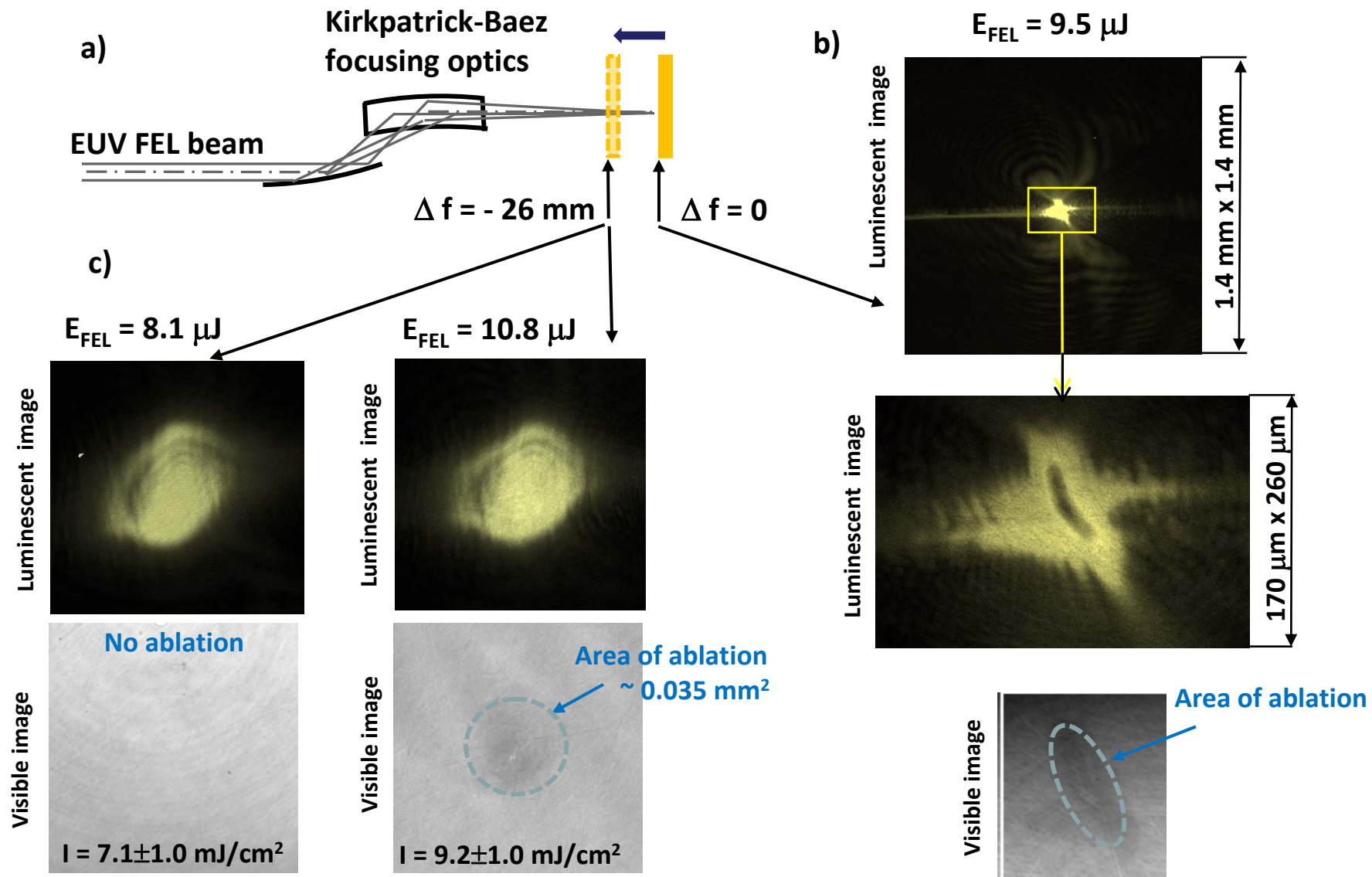


Fig. 2

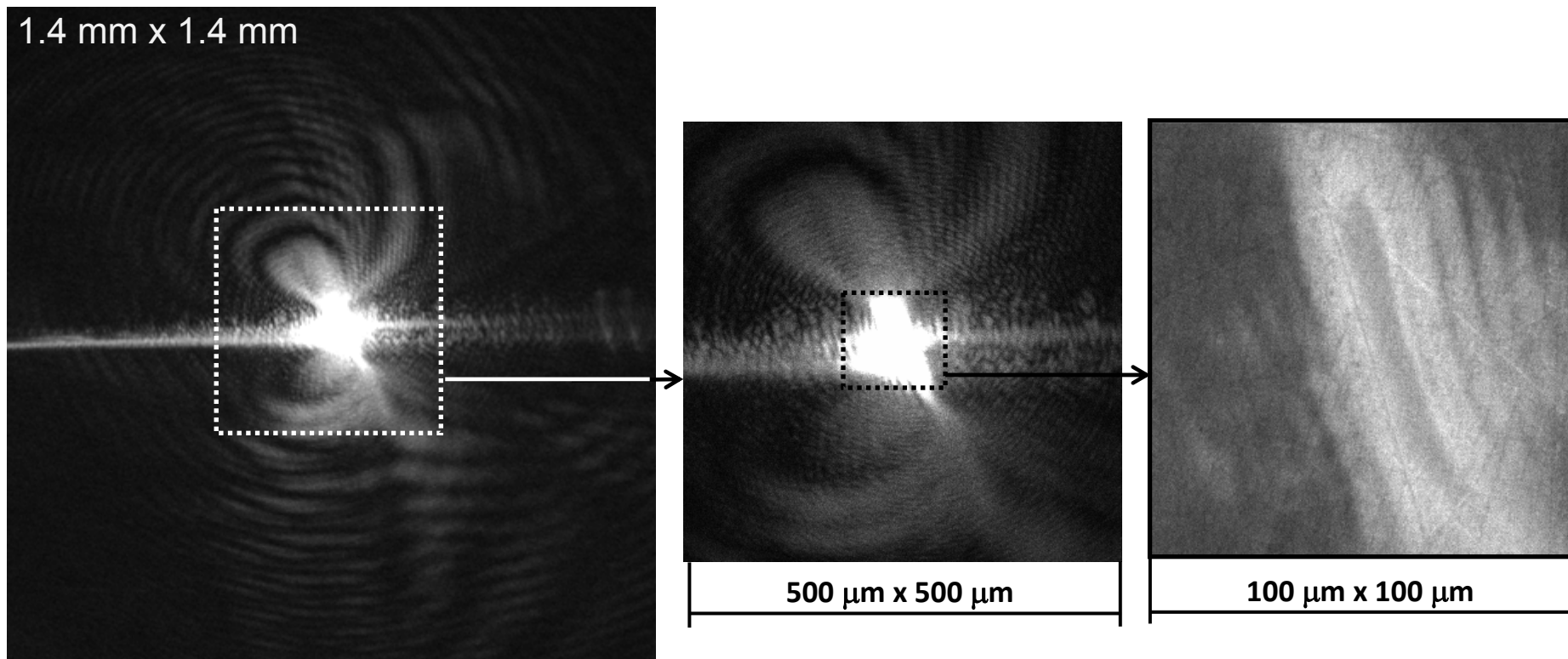


Fig. 3

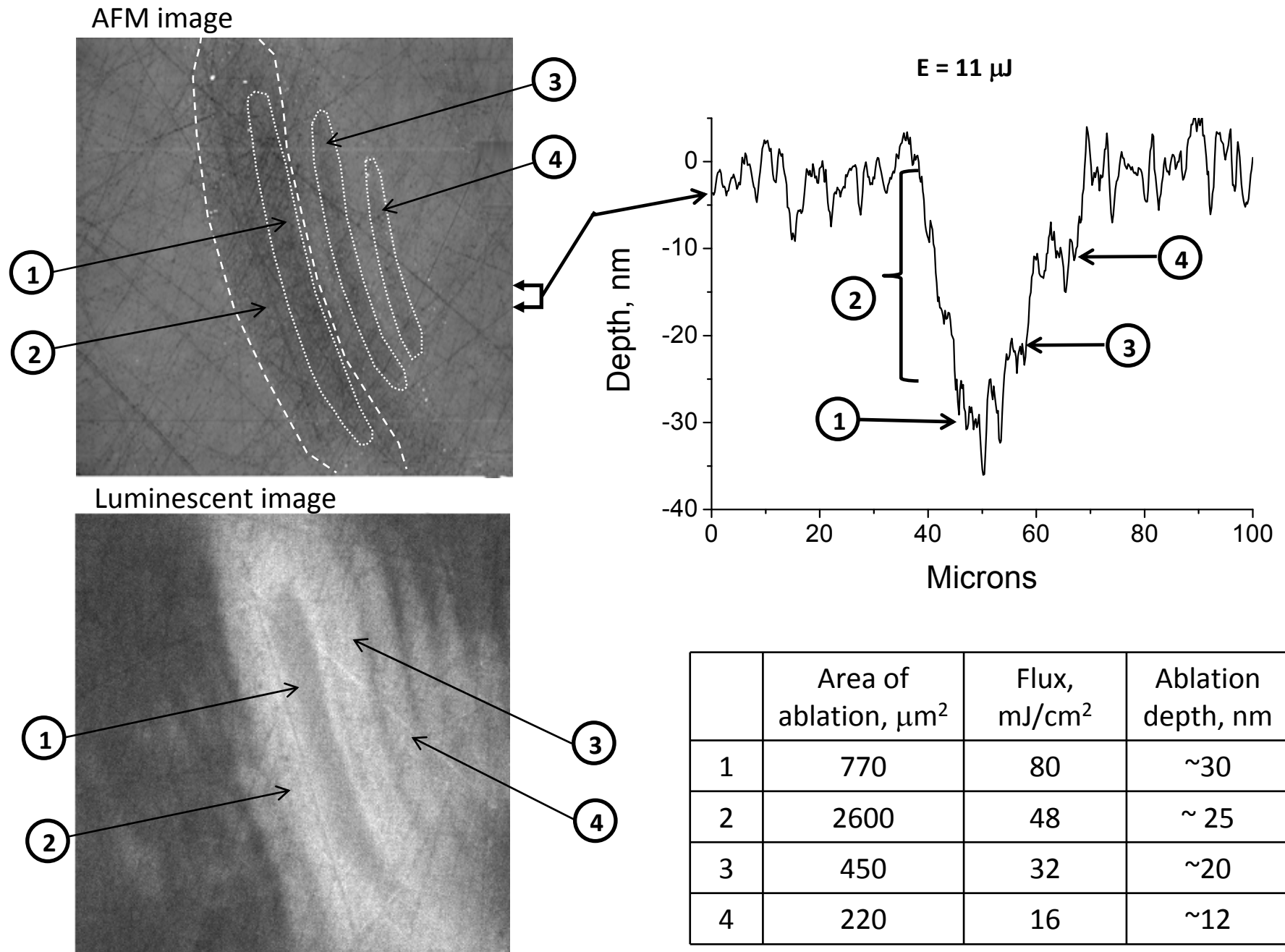


Fig. 4

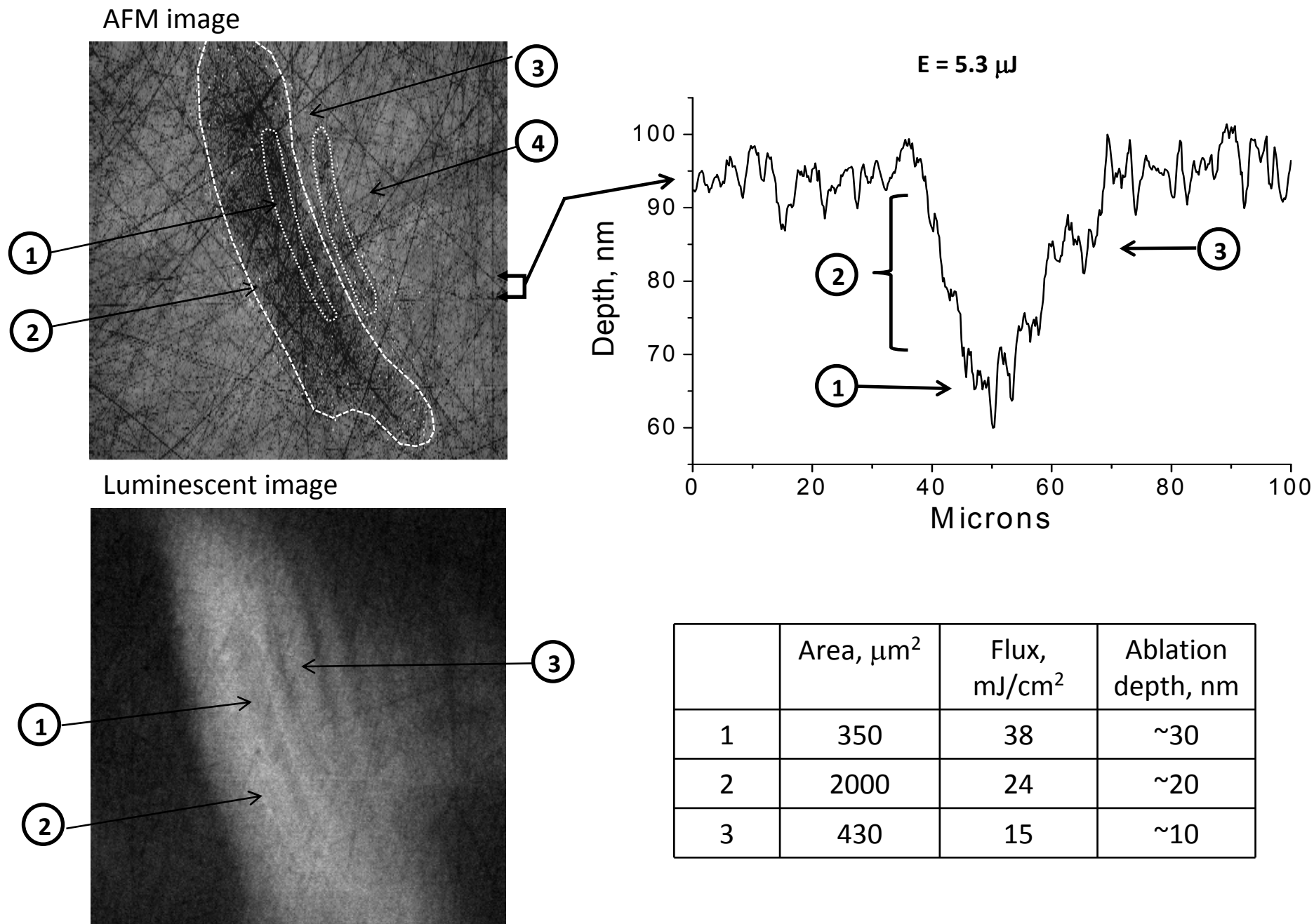
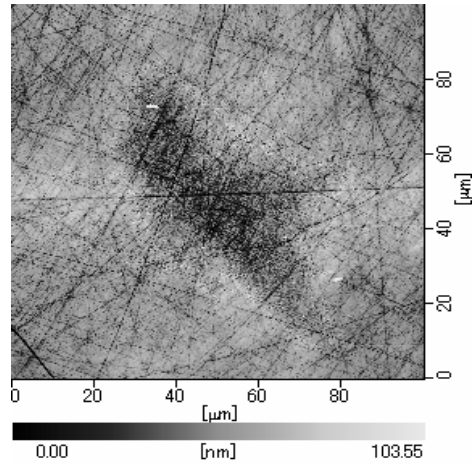
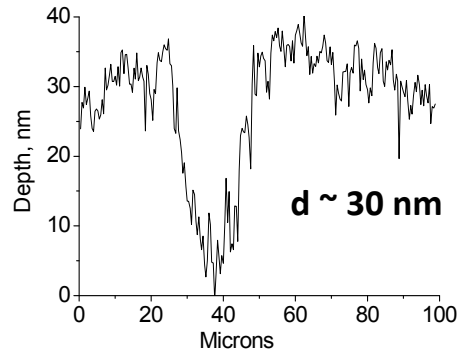


Fig. 5

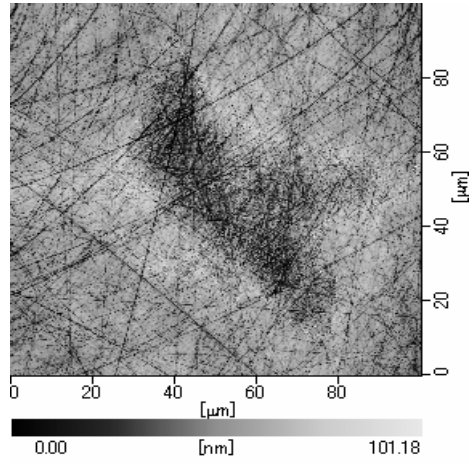
E = 6.35 μJ ; 1 shot



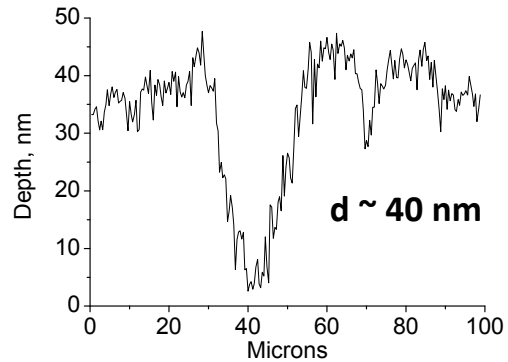
I = 110 $\text{mJ}/\text{cm}^2/\text{shot}$



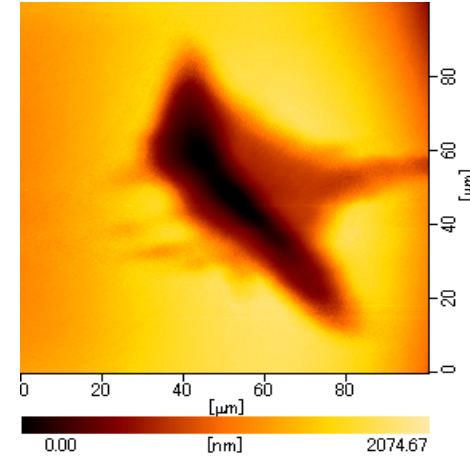
E = 10.3 μJ ; 1 shot



I = 150 $\text{mJ}/\text{cm}^2/\text{shot}$



E = 7.1 $\mu\text{J}/\text{shot}$; 100 shots



I = 90 $\text{mJ}/\text{cm}^2/\text{shot}$

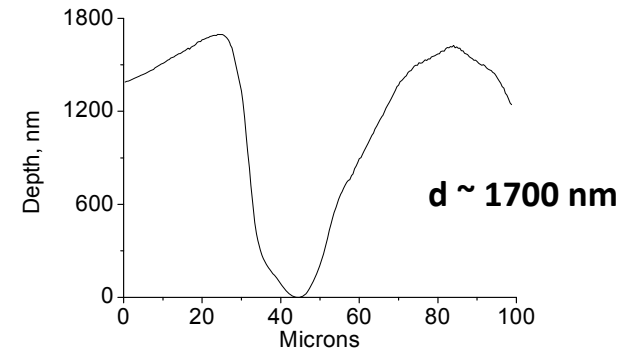


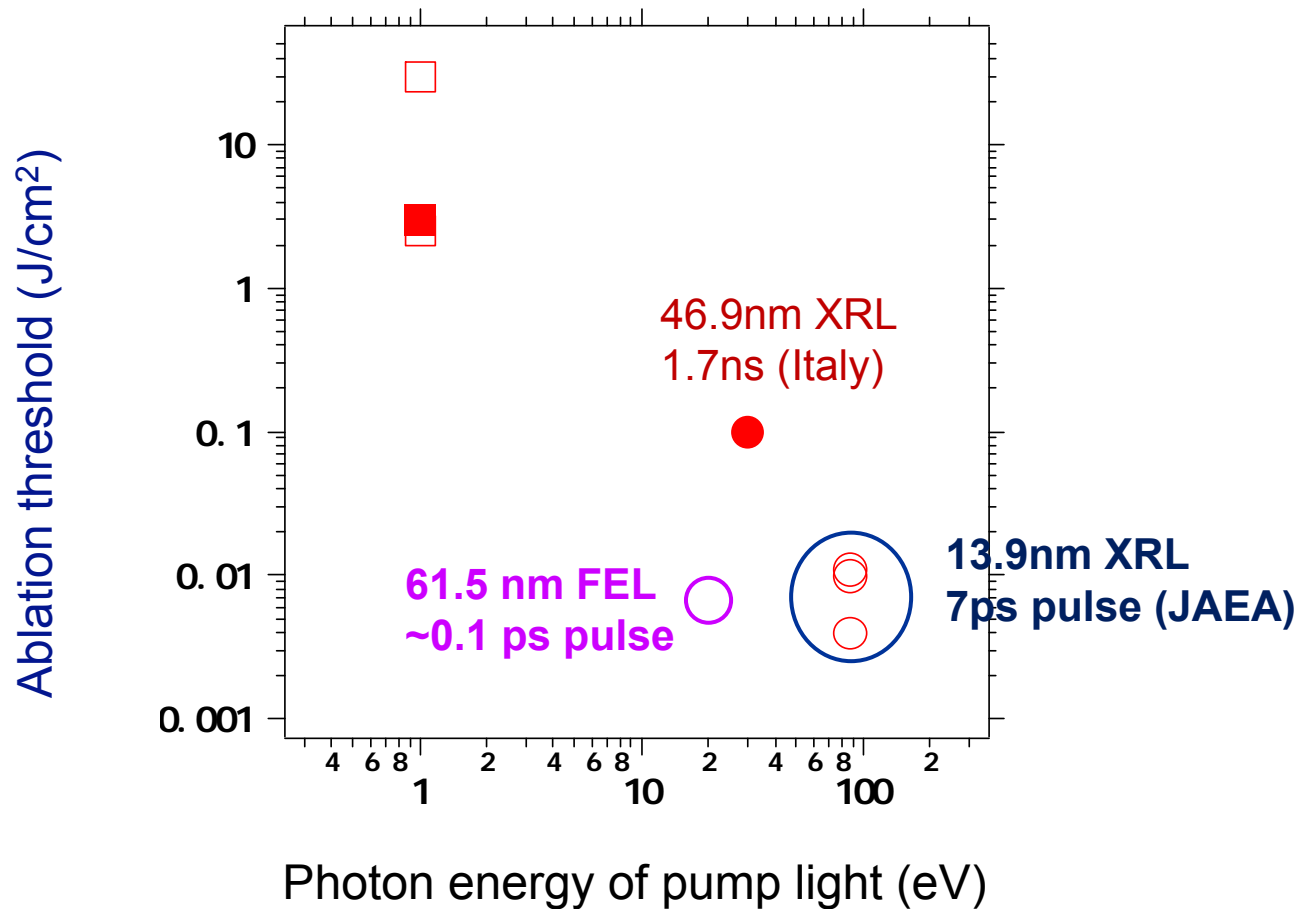
Fig. 6

Соавторы по работе на РЛ 1 и 2:

столкновительные переходы в плазменной колонке на серебре и РЛСЭ

- Т.А. Пикуз, Ю. Фукуда, М. Кандо, Y. Kato, М. Танака, М. Кишимото, М. Ишино, М. Нишикино, Т. Кавачи, М. Нагасоно, Х. Охаши, М. Ябаши, К. Тоно, И. Сенба, Т. Тогаши, Т. Ишикава
- *Kansai Photon Science Institute, Japan Atomic Energy Agency, Kyoto 619-0215, Japan*
- *The Graduate School for the Creation of New Photonics Industries, Hamamatsu, Shizuoka 431-1202, Japan*
- *XFEL RIKEN, SPring-8, Hyogo 679-5198, Japan*
- *JASRI, SPring-8, Hyogo 679-5198, Japan*

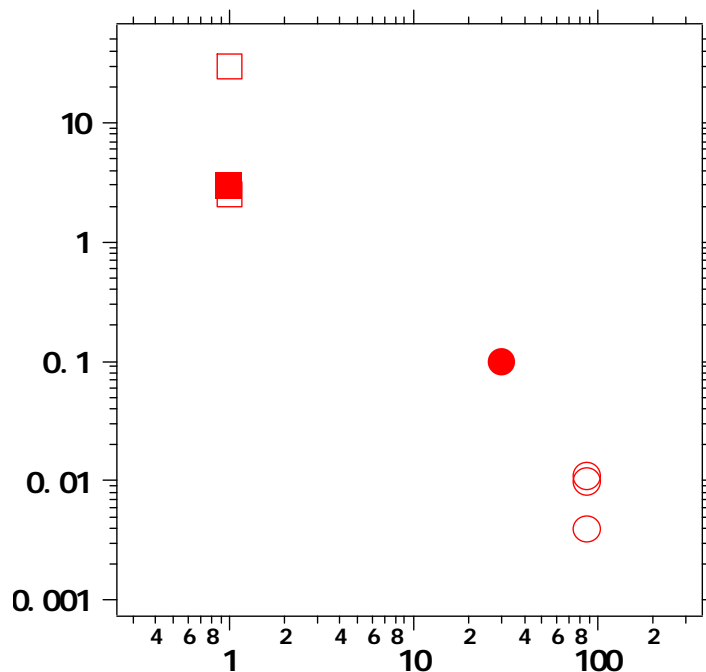
**Drastic decrease of ablation threshold fluence
in case of ultrashort X-ray pulse
in comparison with long or short visible laser pulses
or ns soft XRL pulses**



Faenov, Inogamov et al., Appl.Phys.Lett., 2009; Inogamov, Faenov et al., Cont.Plasma Phys., 2009; Inogamov et al., Appl.Phys.Lett.,2010

Два ОСНОВНЫХ ВЫВОДА

- Во-первых, показано, что порог абляции остается низким на другом РЛ с длительностью импульса в 50 раз меньше и квантом в 4.5 раза меньшей энергии
- При этом пороги на серебряном РЛ и на РЛСЭ отличаются мало
- Во-вторых, толщина унесенного абляцией слоя медленно растет с флюенсом



- Развита нами теория объясняет слабую зависимость от длительности импульса и энергии кванта – (1) важно чтобы импульс был короче звукового времени и (2) важна суммарная вложенная энергия, а не $h \cdot \nu$
- Медленный рост глубины кратера связан с переходом к испарительному режиму абляции

Физическая модель воздействия ультракороткого импульса РЛ на диэлектрик

$$n_p \frac{\partial Z}{\partial t} = \frac{I}{\hbar \omega_L D_{att}} + \nu_{imp} n_e - \kappa_{rec} n_e^3,$$

$$\rho^0 \frac{\partial (E_e / \rho)}{\partial t} = \frac{\rho^0}{\rho} \frac{I}{D_{att}} - n_p^0 \Delta \frac{\partial Z}{\partial t} - \frac{\rho^0}{\rho} \alpha (T_e - T_i) - p_e \frac{\partial u}{\partial x^0},$$

$$\rho^0 \frac{\partial (E_i / \rho)}{\partial t} = \frac{\rho^0}{\rho} \alpha (T_e - T_i) - p_i \frac{\partial u}{\partial x^0},$$

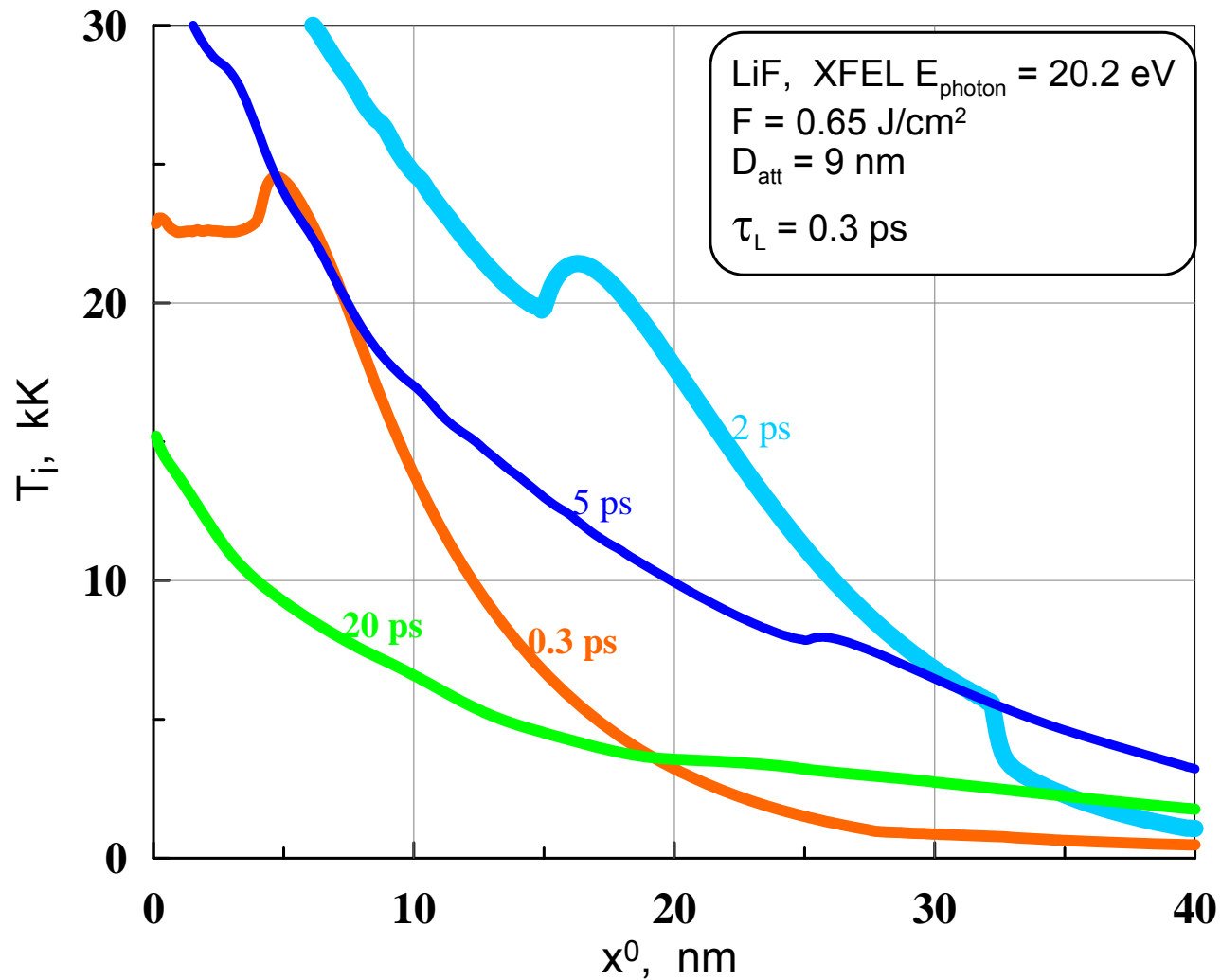
$$\rho^0 \frac{\partial u}{\partial t} = - \frac{\partial p}{\partial x^0},$$

$$\rho(x^0, t) \frac{\partial x(x^0, t)}{\partial x^0} = \rho^0,$$

$$\frac{\partial x(x^0, t)}{\partial t} = u(x^0, t).$$

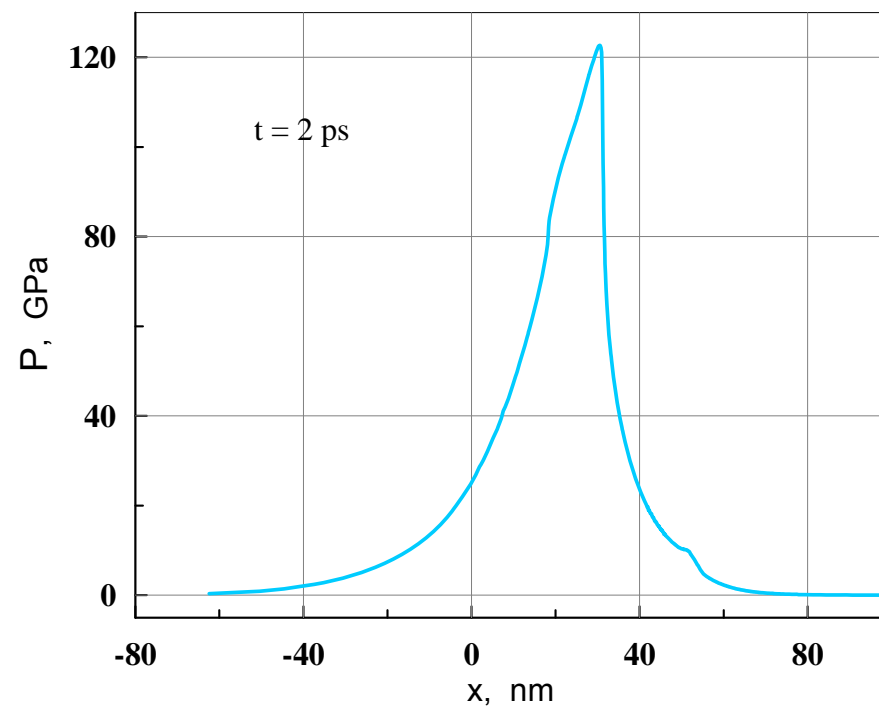
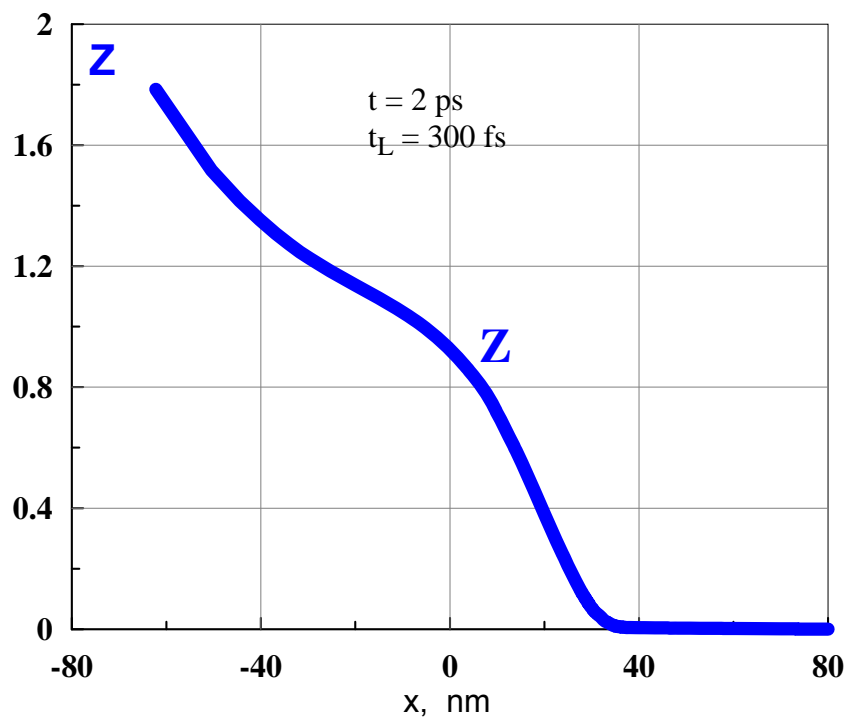
Пример расчета. Показано, что глубина кратера медленно растет с энергией ультракороткого импульса РЛ. Испаряется вещество температура, которого находится в диапазоне 5-10 кК.

Здесь x^0 – лагранжева координата



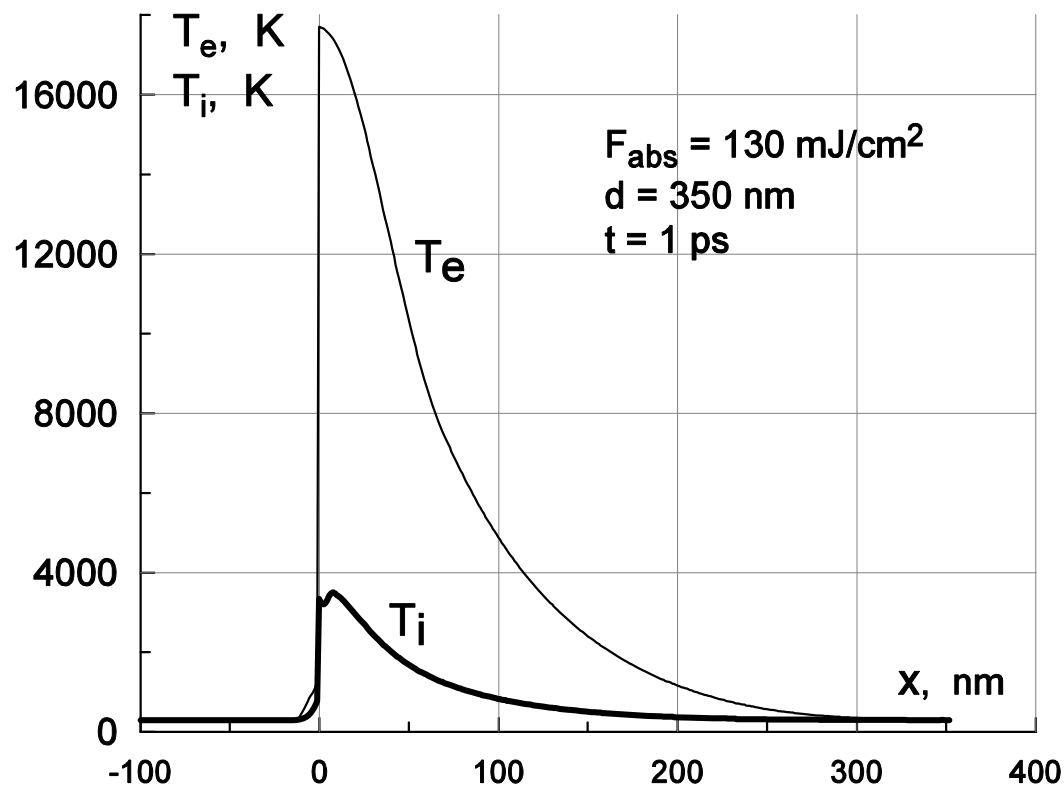
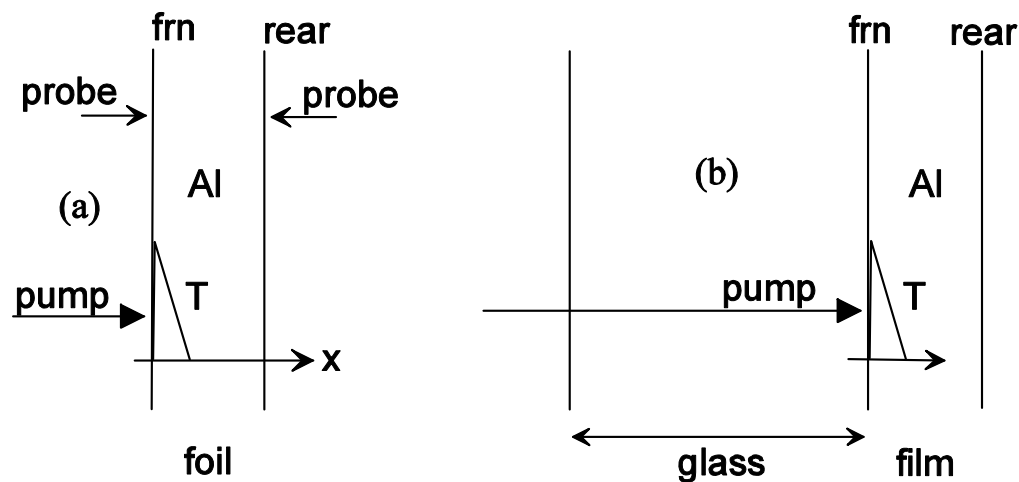
Степень ионизации Z доходит до значений ~ 1 , а давления достигают величин порядка 1 Мбар.

Правда, это расчет с флюенсом, примерно втрое превышающим максимальный достигнутый на сегодня на РЛСЭ

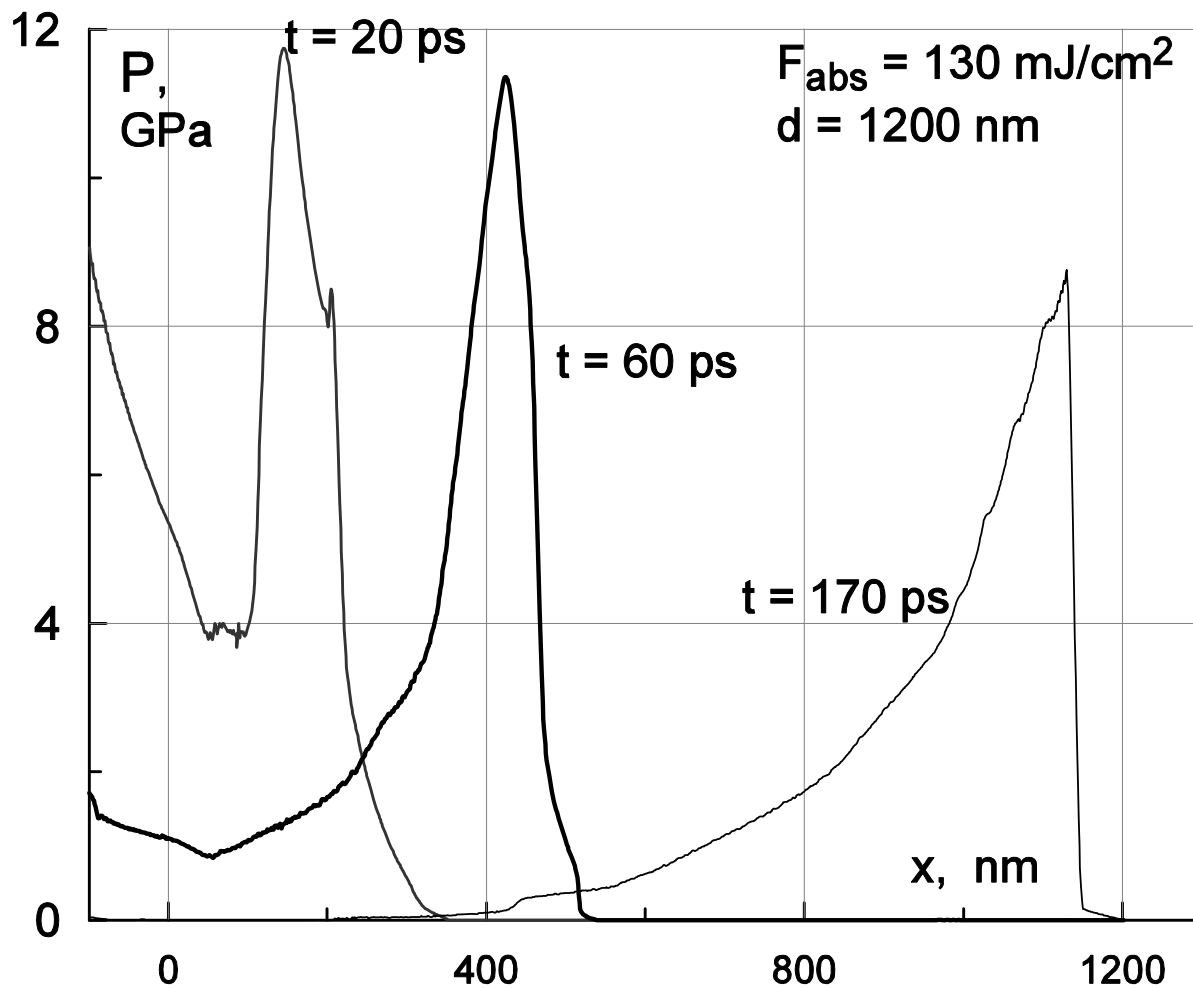
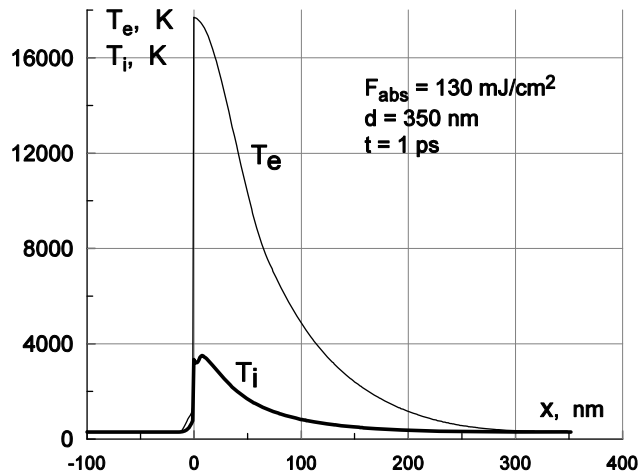


От рентгена к оптике

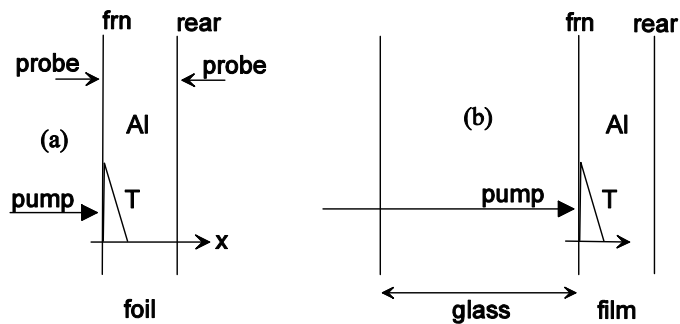
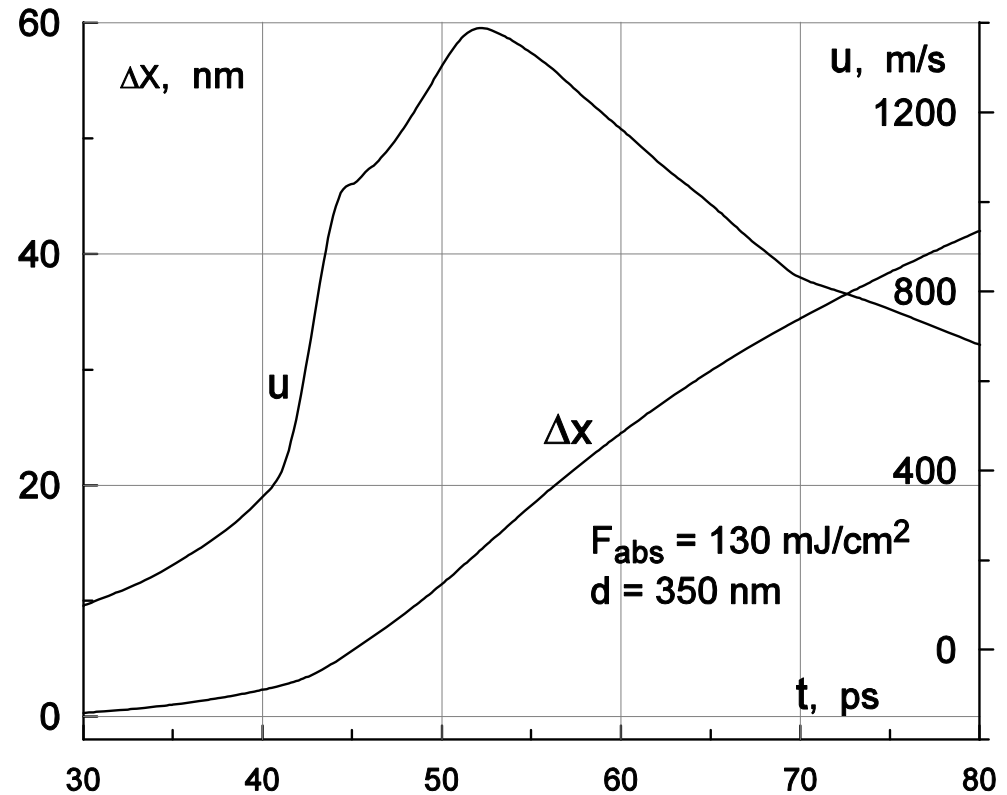
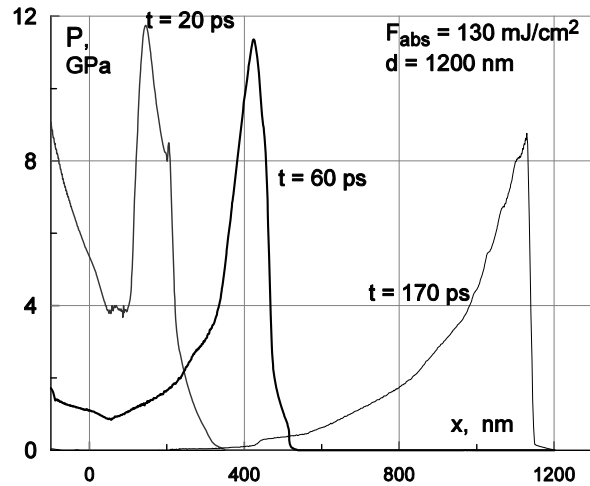
Оптические лазеры с ультракоротким импульсом



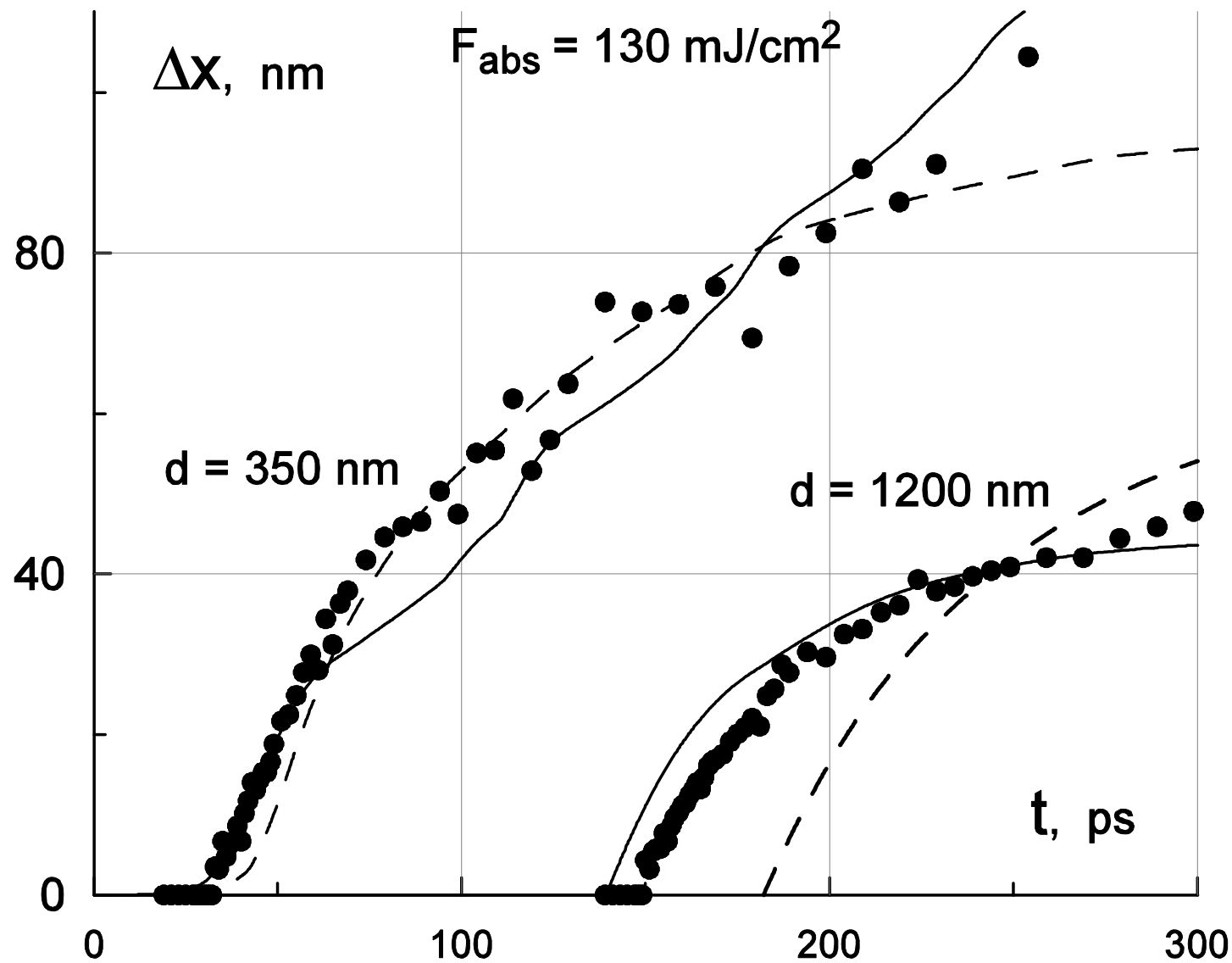
Генерация умеренно нелинейной акустической ВОЛНЫ: распределение температуры и разбегание волн



Прибытие акустической волны на тыльную сторону и смещение этой стороны

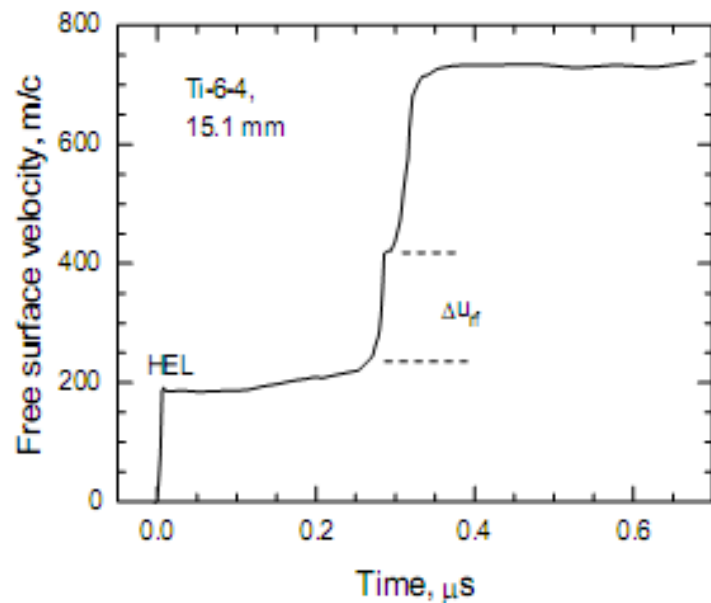


Pump-probe измерение смещения



Упруго-пластические явления

- Проблематика связанная с ударными волнами в конденсированных средах. Расщепление волны – двухволновая конфигурация: упругий предвестник и пластическая ударная волна.

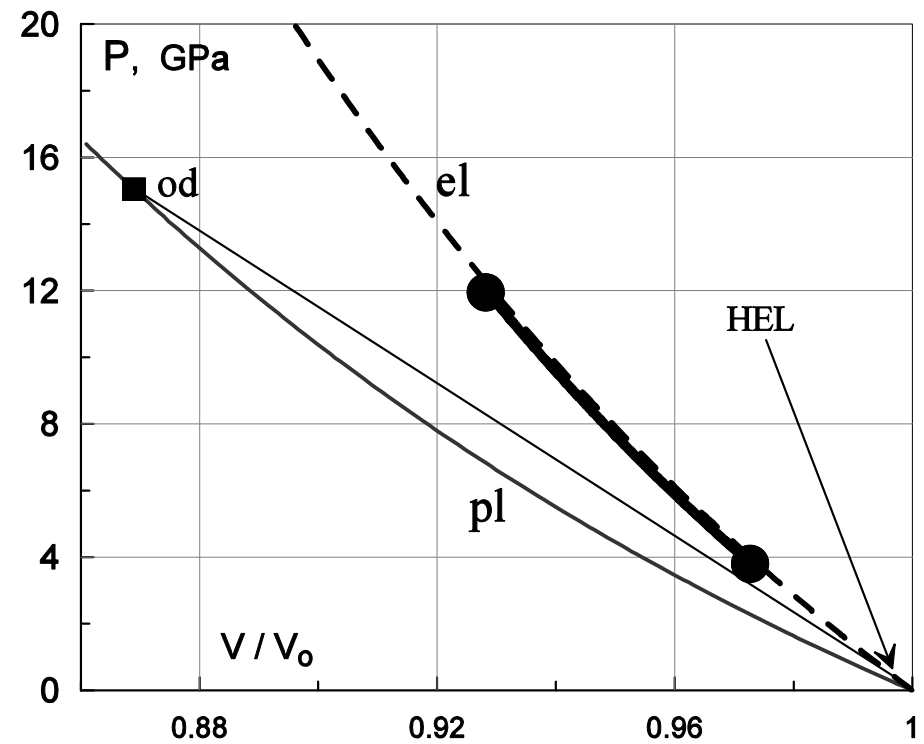
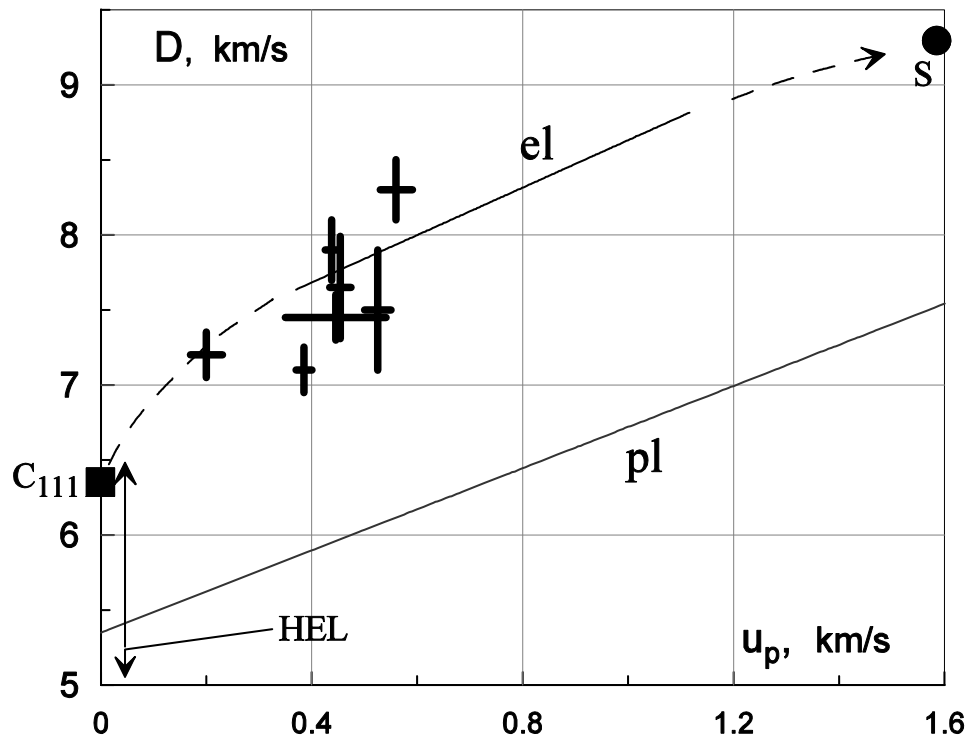


Free surface velocity history measurement of Ti-6Al-4V alloy.

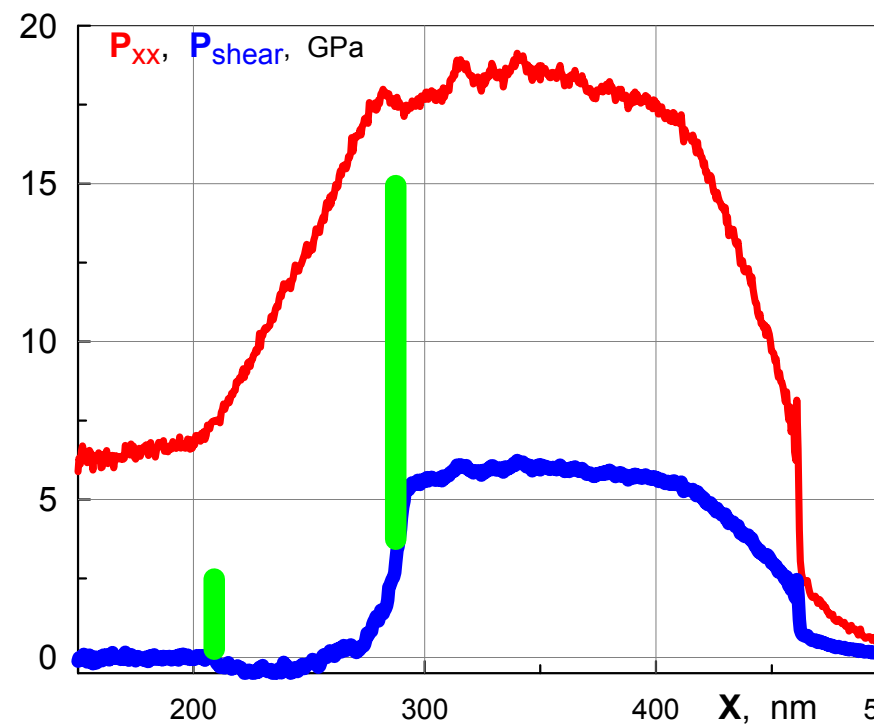
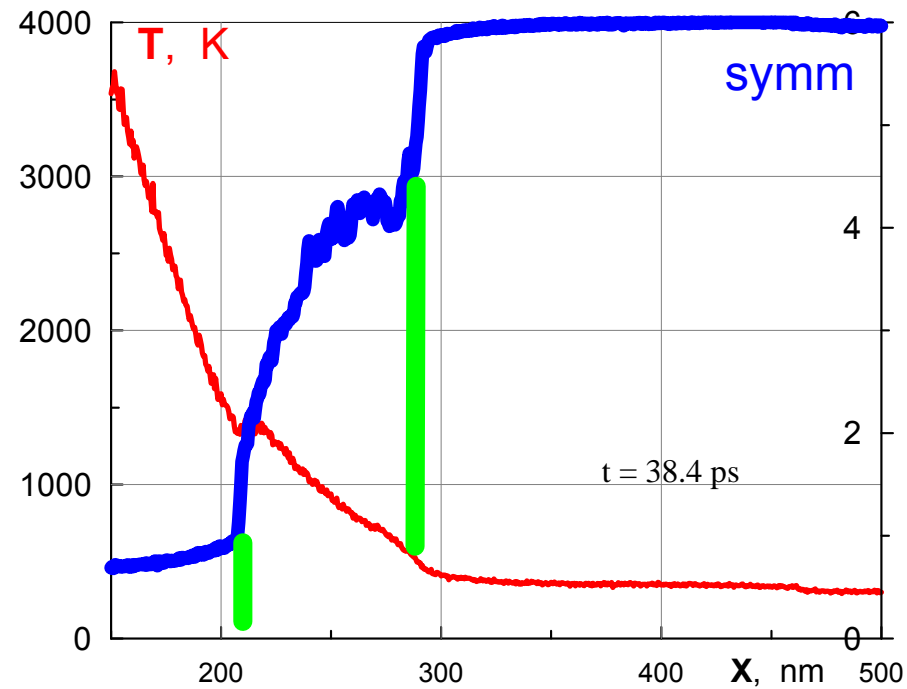
Material	Density ρ_0 , g/cm ³	Bulk sound velocity, c_b , km/s	Longitudinal sound velocity, c_{ℓ} , km/s	HEL, GPa	Dynamic yield strength, Y_d , GPa	Spall strength, GPa
Aluminum 2024	2.78	<u>5.25</u>	<u>6.36</u>	<u>0.6</u>	0.29	<u>1.15</u>
Aluminum AMg6M	2.61	5.3	6.4	0.38	0.18	0.8–1.1
Magnesium Ma1	1.75	4.5	5.6	0.2	0.1	0.8
Titanium Ti-6Al-4V	4.45	5.11	6.15	2.0	0.92	3.6–4.4

- Пример из Канель, Разоренов, Фортов, 2004

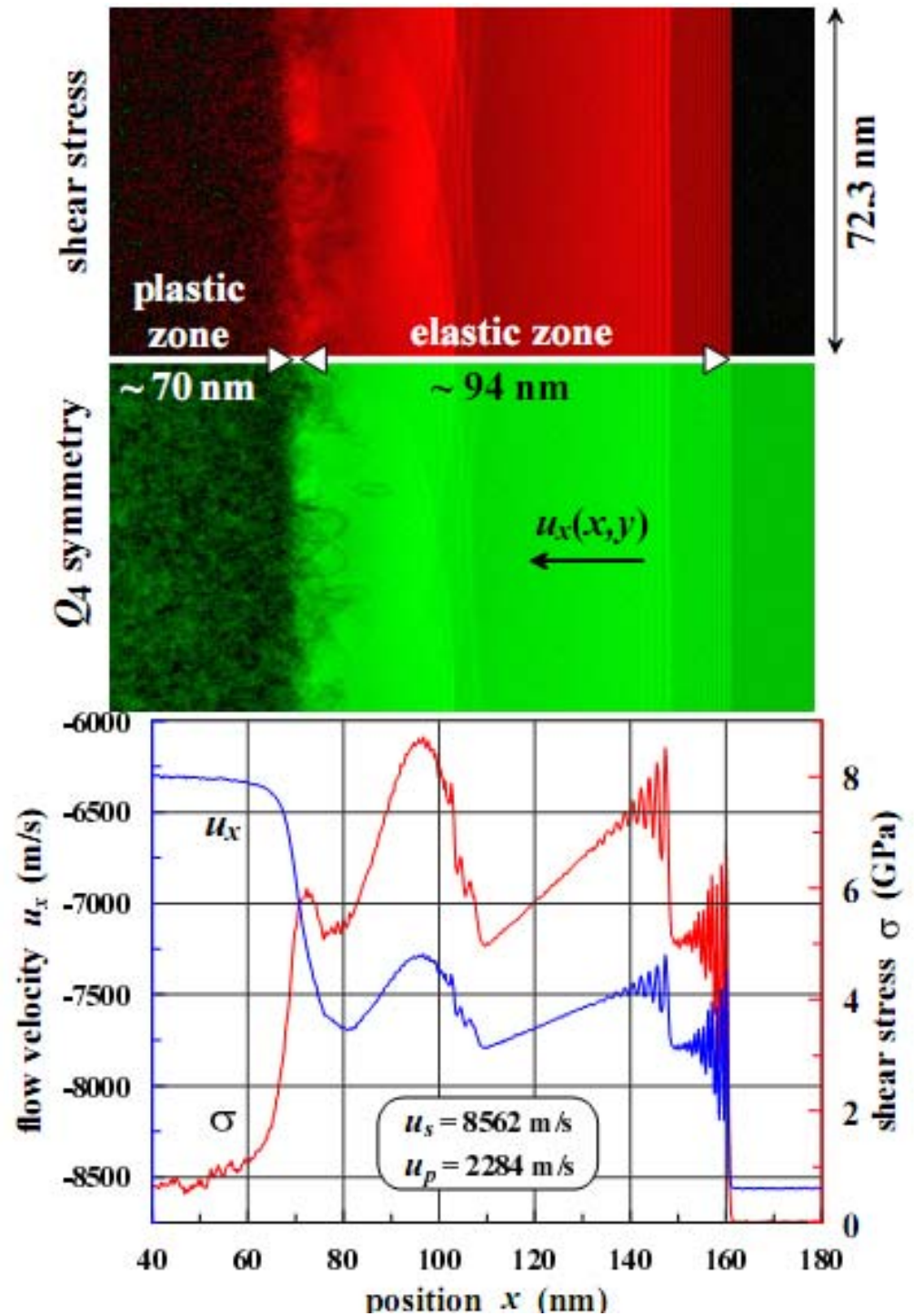
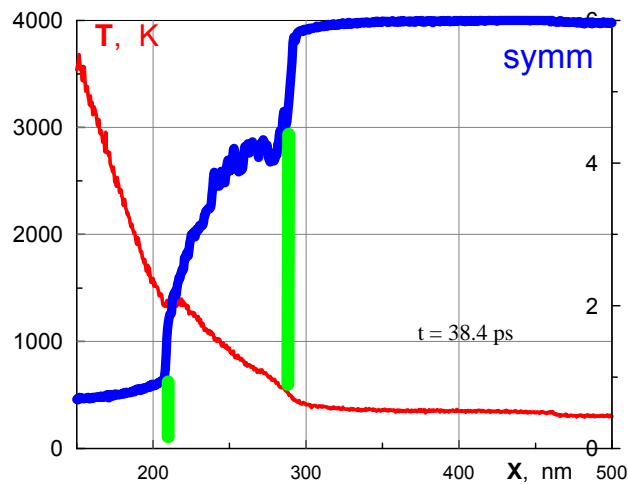
Сохранение упругого состояния в ударной волне в фс лазерном эксперименте при давлениях, более чем на порядок превышающих привычные значения



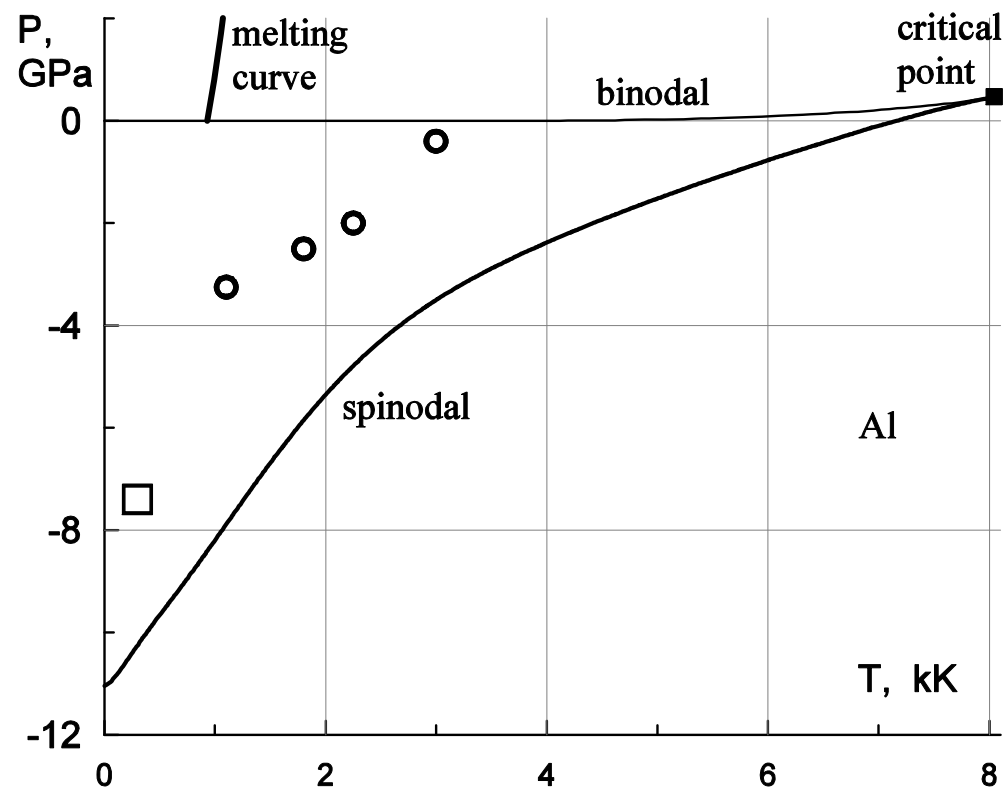
Выживание решетки при гигантских сдвиговых напряжениях



МД моделирование лазерного воздействия и МД моделирование ударных волн в кристалле



Определение прочности конденсированных сред при сверхвысоких темпах деформации



Заключение

- Проведен сравнительный анализ экспериментов на РЛ на плазме серебра и РЛСЭ. Объяснено, почему порог абляции мал по сравнению с другими лазерами. Это связано с термомеханическим характером абляции ультракоротким импульсом
- Предложено объяснение медленному росту глубины кратера с флюенсом в случае РЛ
- Обнаружено, что в фс лазерном эксперименте кристалл металла остается в упругом состоянии при чрезвычайно высоких сдвиговых напряжениях
- Определена прочность алюминия при экстремальных темпах растяжения