

Физика взаимодействия лазерного излучения с веществом

Иногамов Н.А.

<https://www.itp.ac.ru/ru/persons/inogamov-nail-alimovich/>

Объект - субъект

Объект = что изучаем, зачем

Субъект = кто и как изучает, физика, физические модели,
что умеет, чем пользуется:инструментарий, технические инструменты =
от уравнений до программ

История в общих чертах

1880 - 1980

- Молодежь со склонностью к науке и технике интересуется:



1880 - 1980

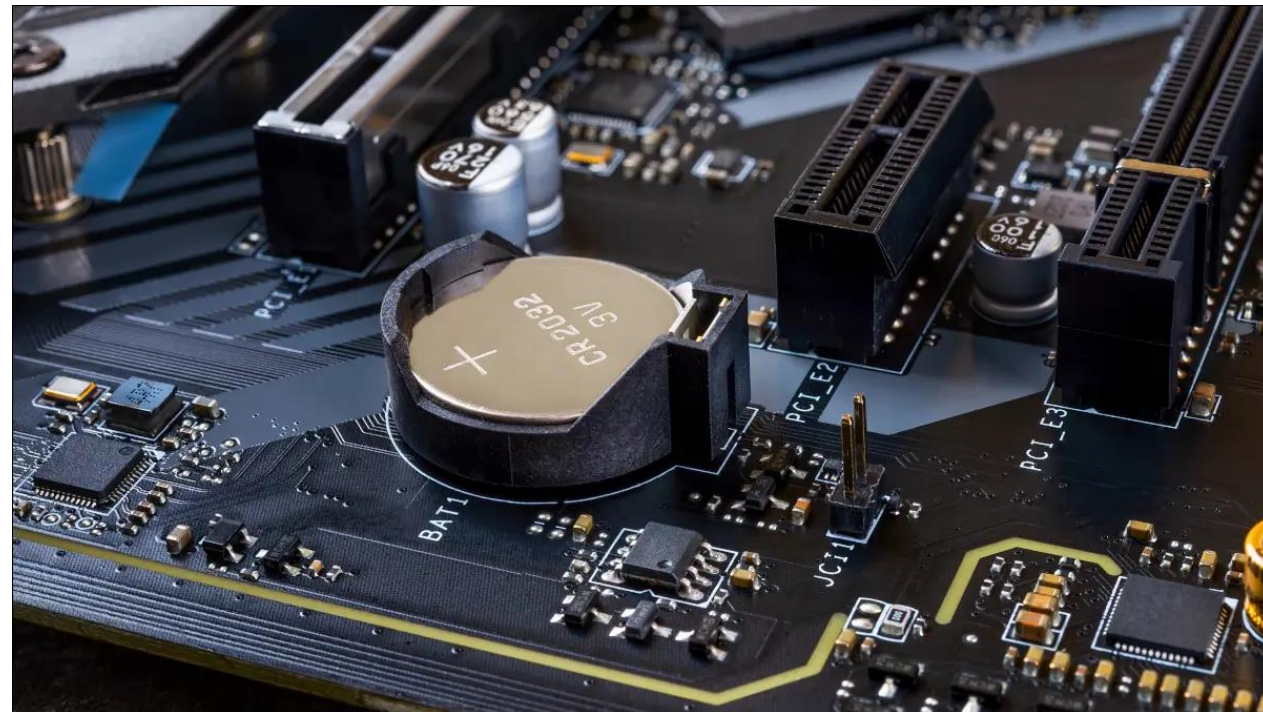
- Молодежь со склонностью к науке и технике интересуется



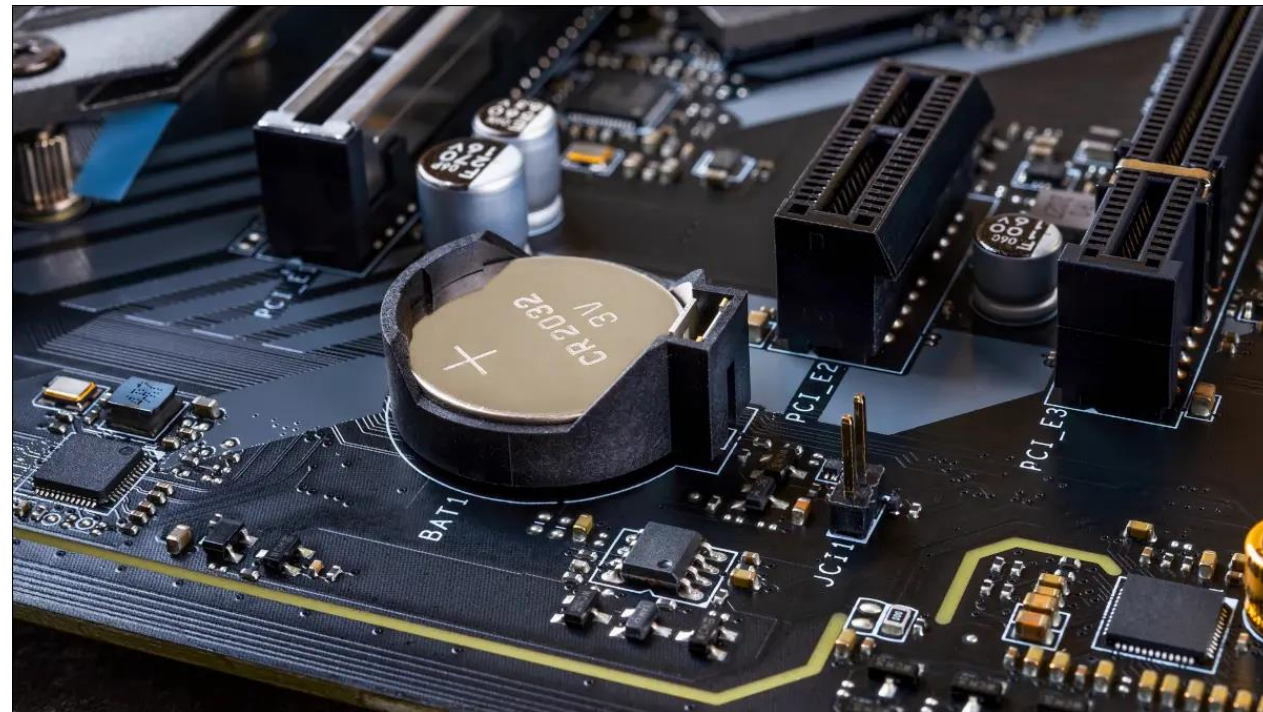
То есть это «железо», моторы. Царица наук – это механика

~ 1980 – н.в.

- Молодежь со склонностью к науке и технике интересуется:

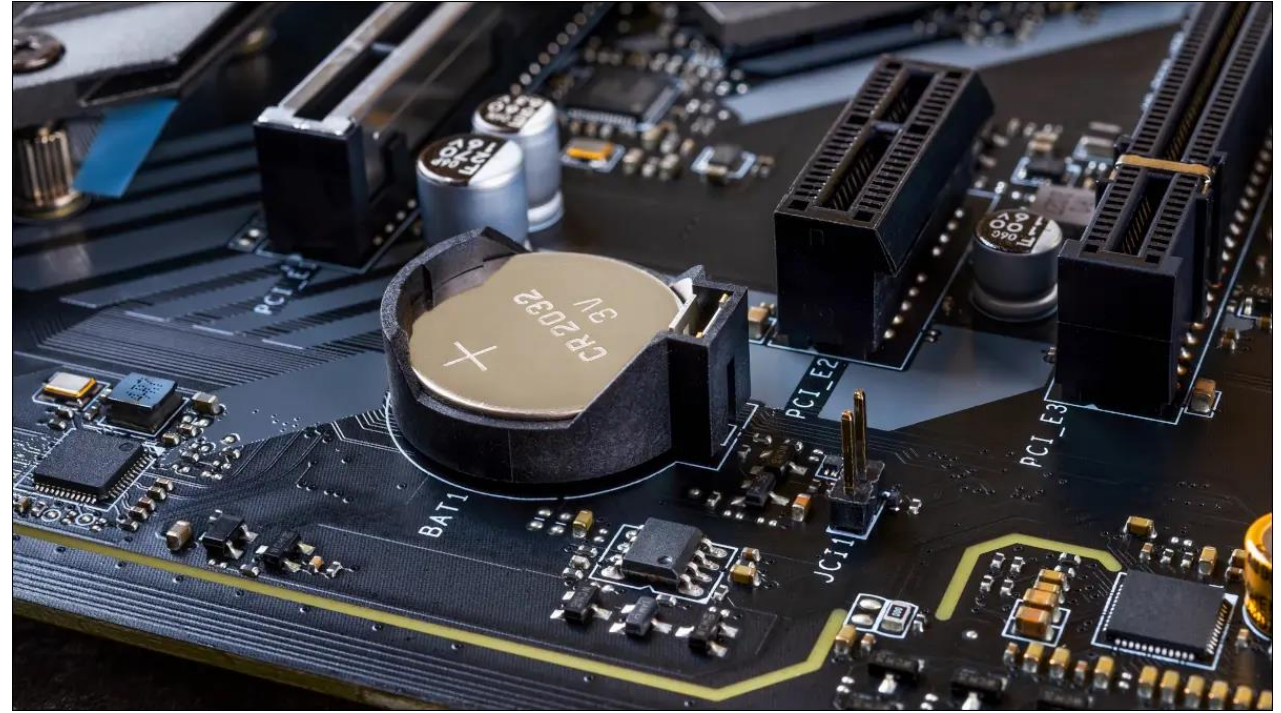


~ 1980 – н.в.



Изготовление
и
применение

~ 1980 – н.в.



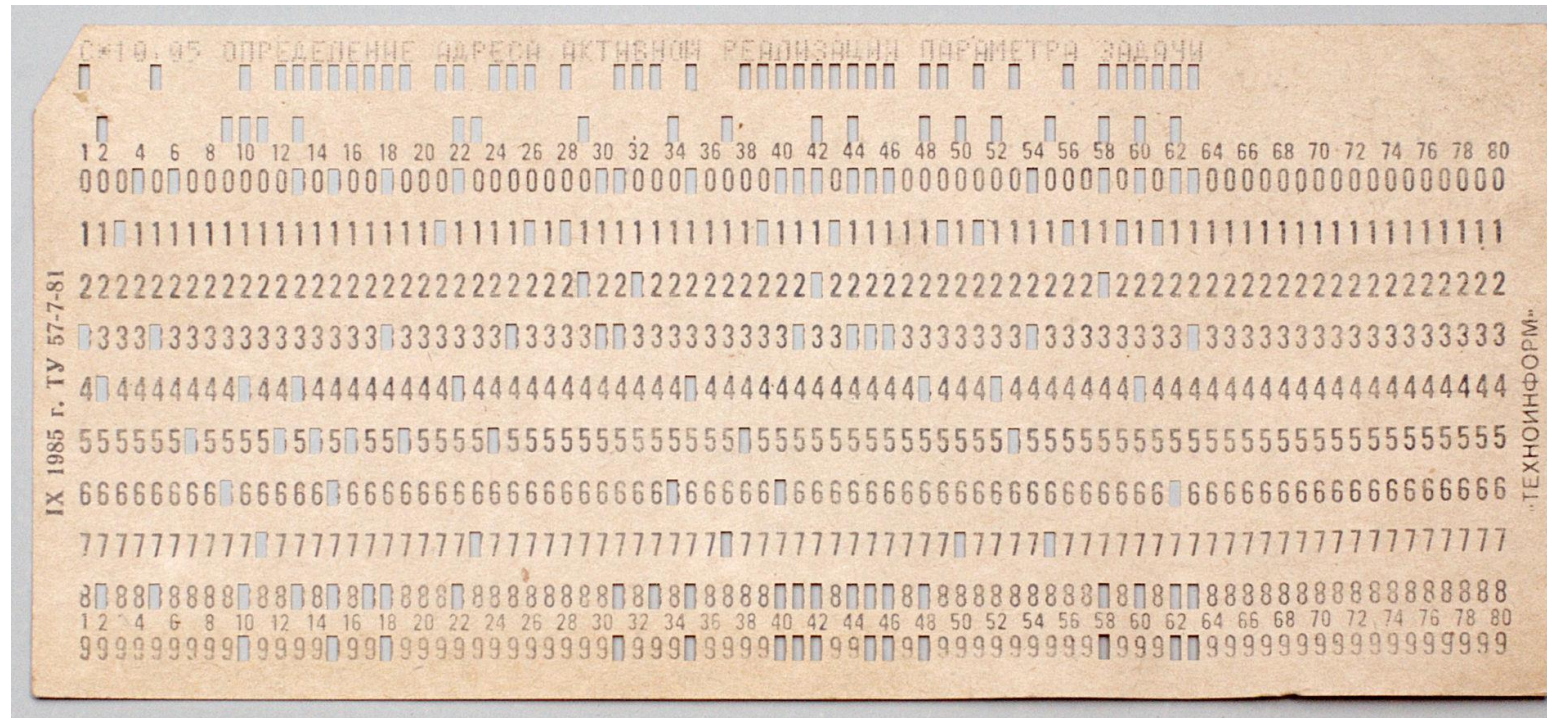
Изготовление – «кванты», фотолитография, роль лазеров
и
Применение – программирование – «программирование»

Применение чипов: программирование («старое») – «программирование» («новое»)

- ~ 1980
- Программы буквально:
- metka 1
- $c = c + 5$
- if $c > 40$ go to metka 2
- otherwise go to metka 1

Применение чипов: программирование («старое») – «программирование» («новое»)

- ~ 1980
- Программы буквально:
- метка 1
- $c = c + 5$
- if $c > 40$ go to метка 2
- otherwise go to метка 1



Программирование сейчас

- Готовые пакеты
- Manual к ним
- Управляющие программы к пакету

Основная работа теперь заключается в чтении мануалов.

Вернее так:

Ставится задача

Находится решатель = прикладной пакет

Освоение пакета = чтение мануала

Готовые пакеты

- VASP = The Vienna Ab initio Simulation Package – DFT код
- DMol3, ABINIT – все это DFT коды
- Для кф
- Для молекул

Готовые пакеты

- VASP = The Vienna Ab initio Simulation Package
- К.П. Мигдал и его ab-initio расчеты

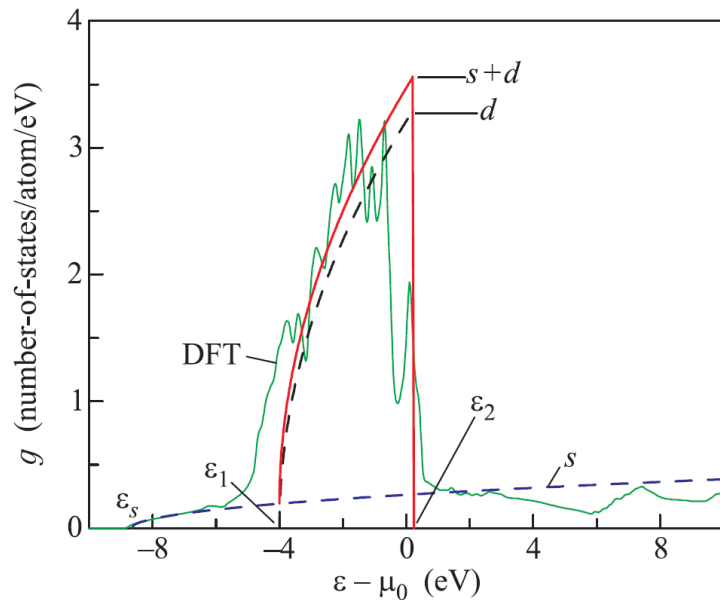


Рис. 1. Приближенное описание зонной структуры никеля с помощью парабол s и d

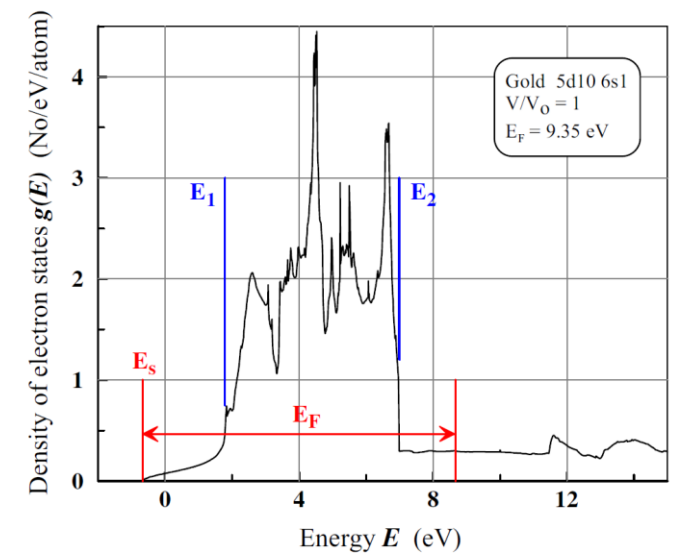
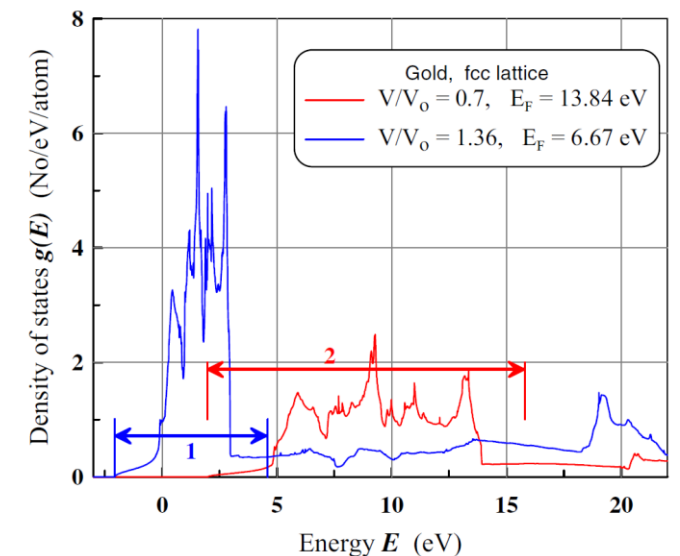


Fig. 1 Conduction band structure of cold gold $5d^{10}6s^1$ at $T_i = 0$, $T_e = 0$ and normal density $V/V_0 = 1$. Calculations of spectra and thermodynamics of gold were performed with VASP package, see details in “Appendix 1.” The energy range labeled E_F contains 11 electrons. The Fermi energy E_F is reckoned from the bottom point E_s of s -band. E_1 and E_2 indicate the left and right edge of d -band, respectively

Yu. V. Petrov · K. P. Migdal · N. A. Inogamov · V. V. Zhakhovsky, Appl. Phys. B (2015)



Готовые пакеты

- VASP = The Vienna Ab initio Simulation Package
- К.П. Мигдал и его ab-initio расчеты

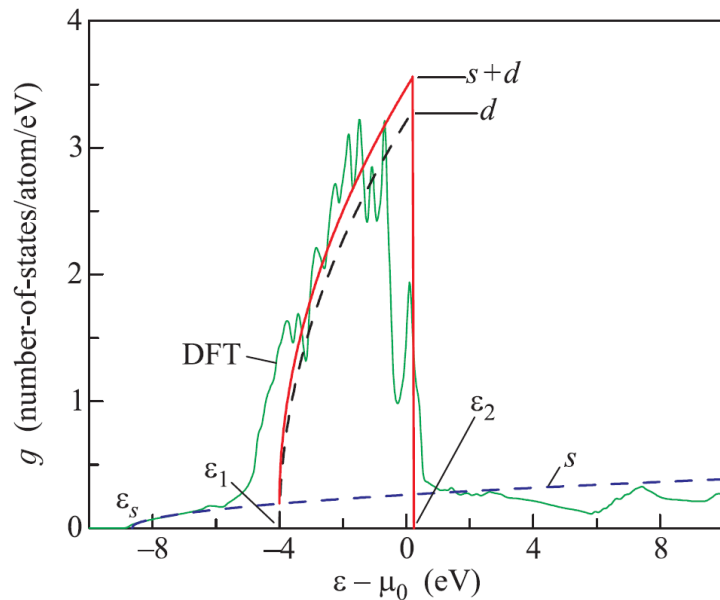


Рис. 1. Приближенное описание зонной структуры никеля с помощью парабол s и d

Зачем эти расчеты электронного спектра?
По ним вычисляем термодинамические и
транспортные характеристики.
Это нужно для моделирования
laser-matter interaction

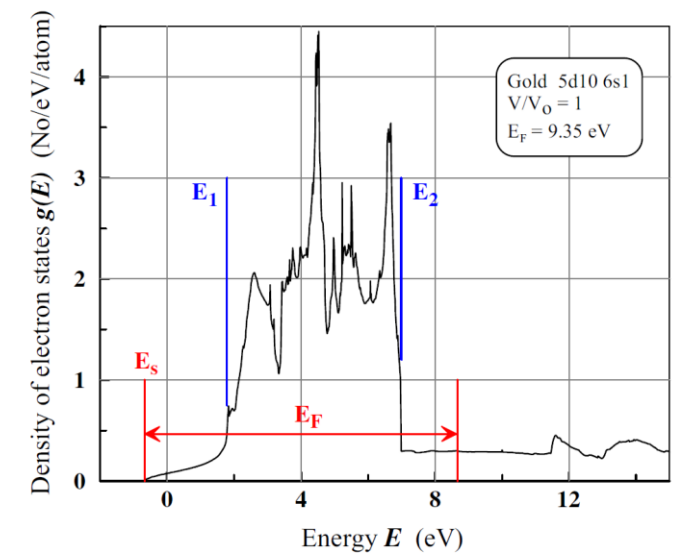
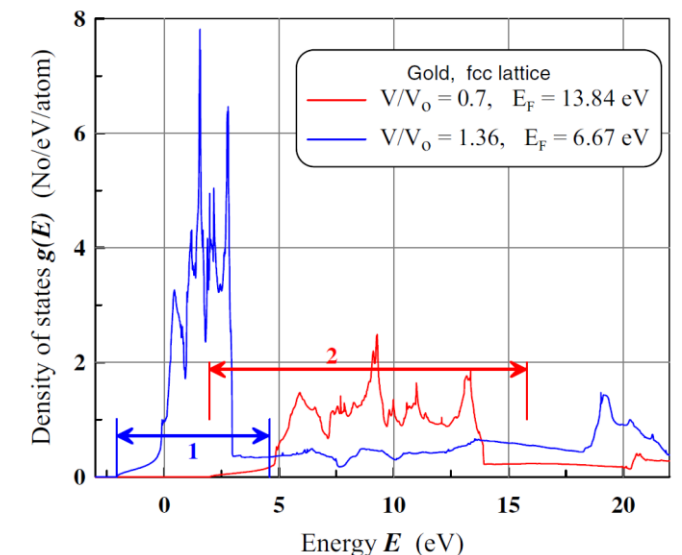
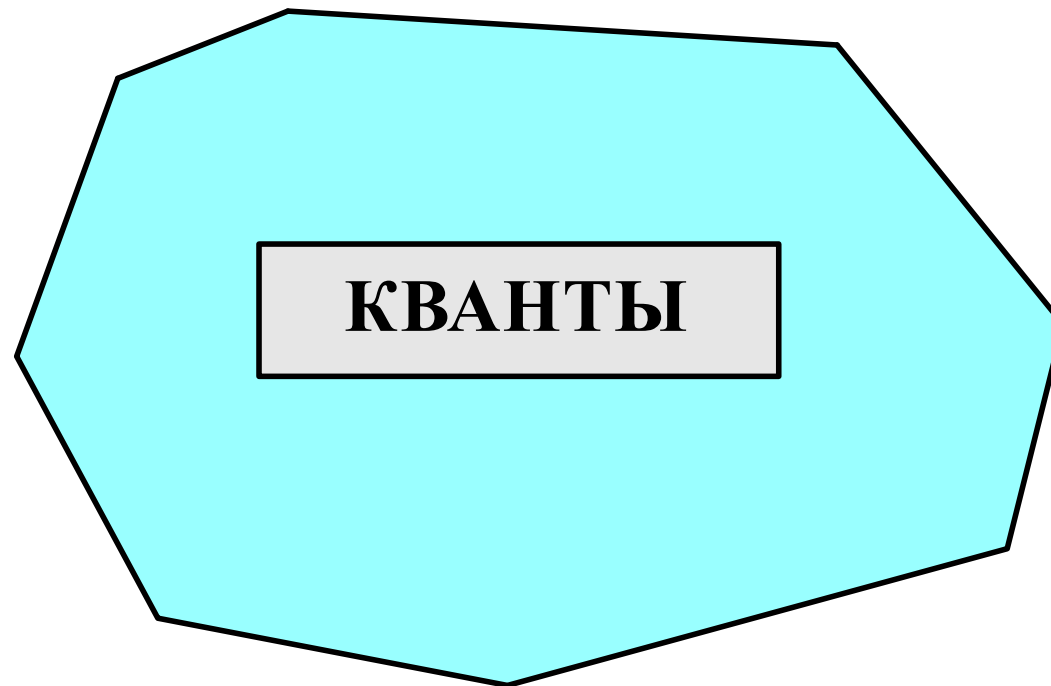


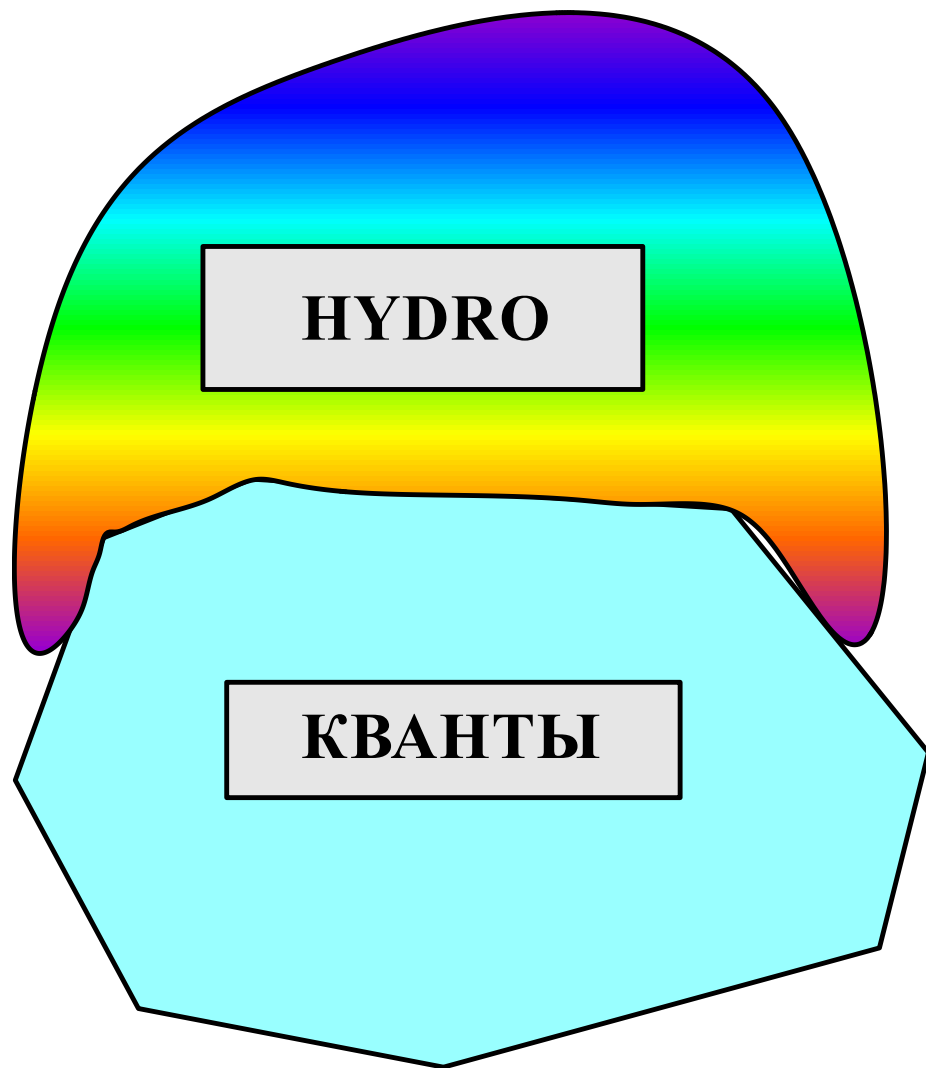
Fig. 1 Conduction band structure of cold gold $5d^{10}6s^1$ at $T_i = 0$, $T_e = 0$ and normal density $V/V_0 = 1$. Calculations of spectra and thermodynamics of gold were performed with VASP package, see details in “Appendix 1.” The energy range labeled E_F contains 11 electrons. The Fermi energy E_F is reckoned from the bottom point E_s of s-band. E_1 and E_2 indicate the left and right edge of d-band, respectively

Yu. V. Petrov · K. P. Migdal · N. A. Inogamov · V. V. Zhakhovsky, Appl. Phys. B (2015)



Инструмент в смысле знания =
профессиональная подготовка





Капиллярные явления

Акустика

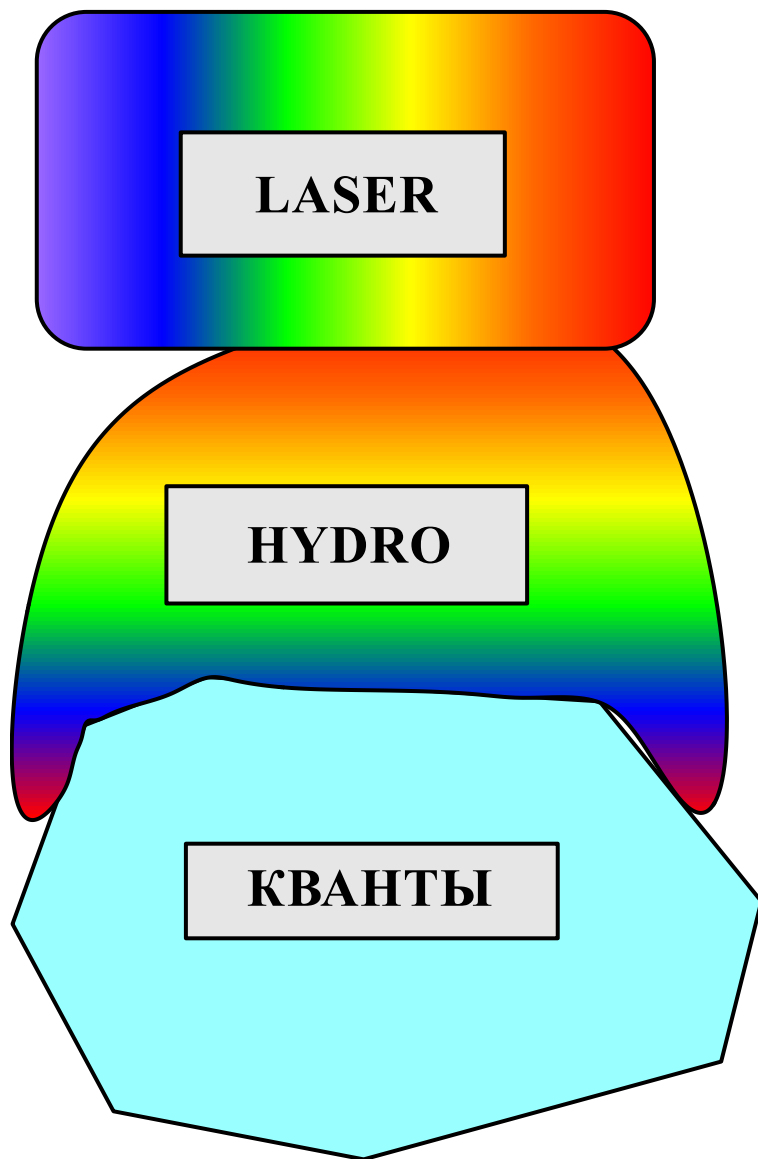
Ударные волны

Термомеханические процессы

Упругость

Упруго-пластичность

Разрушение



ОПТИЧЕСКИЕ, FEL И XFEL
FEL = FREE ELECTRON LASER
XFEL = X-RAY FEL

ИК—ОПТИКА—УФ—EUV/\SXR=SOFT X-RAY

ЭНЕРГЕТИКА
ОТ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ
ДО ПЕТАВАТТНЫХ =СВЕРХИНТЕНСИВНЫЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ
=РЕЛЯТИВИСТСКИЕ ИНТЕНСИВНОСТИ = КИНЕТИЧЕСКАЯ ЭНЕРГИЯ
ОСЦИЛЛЯЦИЙ ЭЛЕКТРОНА В ПОЛЕ ЭМ ВОЛНЫ НАМНОГО
ПРЕВОСХОДИТ ЭНЕРГИЮ ПОКОЯ ЭЛЕКТРОНА 0.5 МЭВ

ДЛИТЕЛЬНОСТИ ИМПУЛЬСА ОТ ФС/ПС ДО НС

- Курс теоретической физики. Учебное пособие для вузов в 10 томах.
- Том I. [Механика](#)
- Том II. [Теория поля](#)
- Том III. [Квантовая механика](#). Нерелятивистская теория
- Том IV. [Квантовая электродинамика](#) (Авторы: [В. Б. Берестецкий](#), [Е. М. Лифшиц](#), [Л. П. Питаевский](#))
- Том V. [Статистическая физика](#). Часть 1.
- Том VI. [Гидродинамика](#)
- Том VII. [Теория упругости](#)
- Том VIII. [Электродинамика сплошных сред](#).
- Том IX. [Статистическая физика](#). Часть 2. (Авторы: [Е. М. Лифшиц](#), [Л. П. Питаевский](#))
- Том X. [Физическая кинетика](#). (Авторы: [Е. М. Лифшиц](#), [Л. П. Питаевский](#))

Наша научная группа

- | | |
|--------------------------------|------------------|
| • Ашитков Сергей Игоревич | ОИВТ |
| • Жаховский Василий Викторович | ВНИИА им. Духова |
| • Иногамов Наиль Алимович | ИТФ им. Ландау |
| • Колобов Юрий Романович | ИПХФ |
| • Ромашевский Сергей Андреевич | ОИВТ |
| • Петров Юрий Васильевич | ИТФ им. Ландау |
| • Хохлов Виктор Александрович | ИТФ им. Ландау |

Наша научная группа

- | | | |
|--------------------------------|------------------|---------|
| • Ашитков Сергей Игоревич | ОИВТ | |
| • Жаховский Василий Викторович | ВНИИА им. Духова | 43/5245 |
| • Иногамов Наиль Алимович | ИТФ им. Ландау | 41/5890 |
| • Колобов Юрий Романович | ИПХФ | 35/5930 |
| • Ромашевский Сергей Андреевич | ОИВТ | |
| • Петров Юрий Васильевич | ИТФ им. Ландау | |
| • Хохлов Виктор Александрович | ИТФ им. Ландау | |

Внешние связи

- Herbert Urbassek
- Baerbel Rethfeld
- Kansai Photon Science Institute

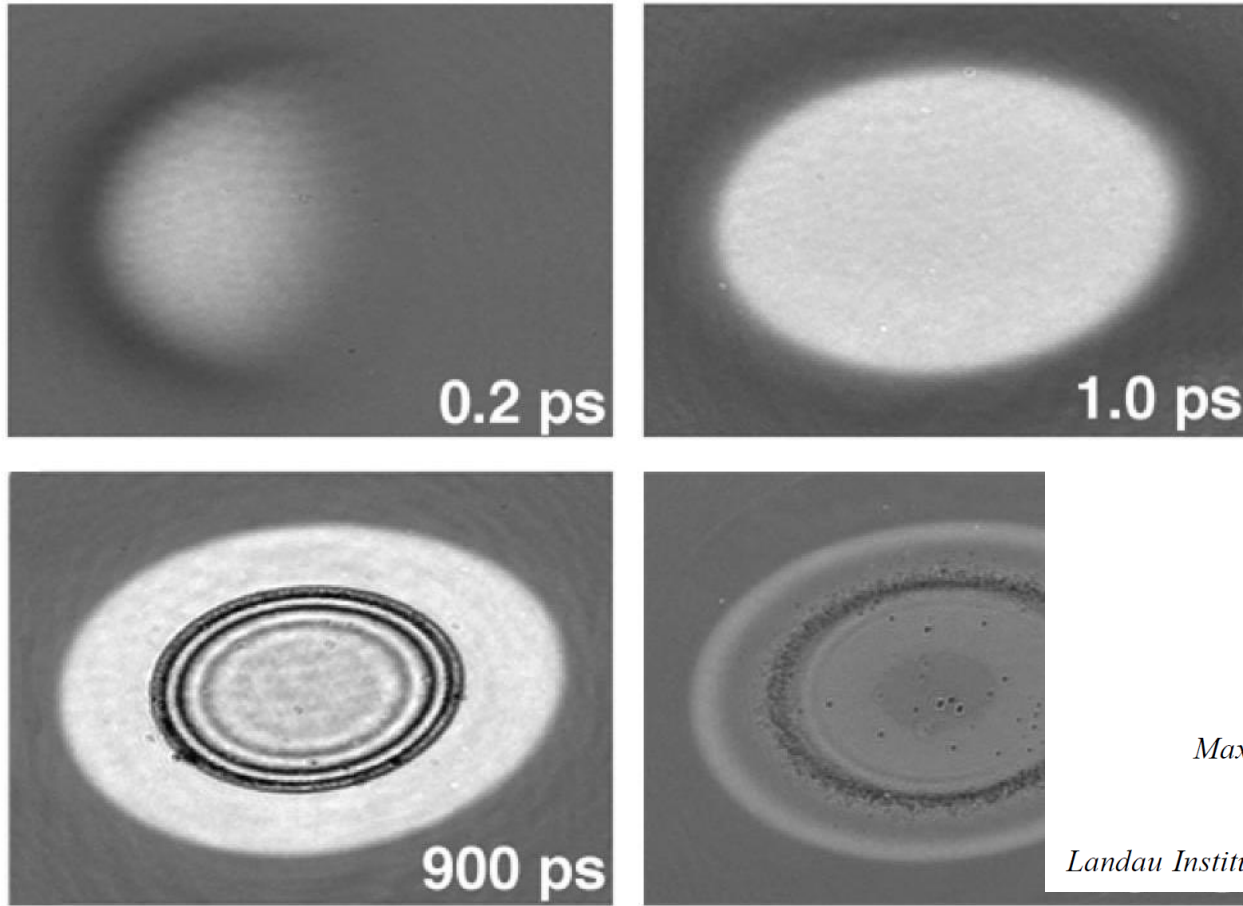
История сектора в ИТФ им. Ландау связана с великими именами

- Основатель сектора **СИ Анисимов**, член-корр РАН
- **ЯБ Зельдович** трижды герой соцтруда сотрудничал в плане науки с СИ Анисимовым
- **Прохоров АМ**, нобелевский лауреат, СИ Анисимов руководил неформальной теоргруппой в его институте
- **Фортов ВЕ**, президент РАН, ближайший коллега СИ Анисимова, совместно решалось множество вопросов

ЗАДАЧИ

Pump-probe (стробоскоп) – отделение нано слоя – кольца Ньютона

- История



Transient States of Matter during Short Pulse Laser Ablation

K. Sokolowski-Tinten, J. Bialkowski, A. Cavalleri, and D. von der Linde
Institut für Laser- und Plasmaphysik, Universität-GHS-Essen, D-45117 Essen, Germany

A. Oparin and J. Meyer-ter-Vehn
Max-Planck-Institut für Quantenoptik, Hans-Kopfermann-Strasse 1, D-85748 Garching, Germany

S. I. Anisimov
Landau Institute of Theoretical Physics, Russian Academy of Science, Institutskii prospekt 12, Chernogolovka, R
(Received 20 March 1998)

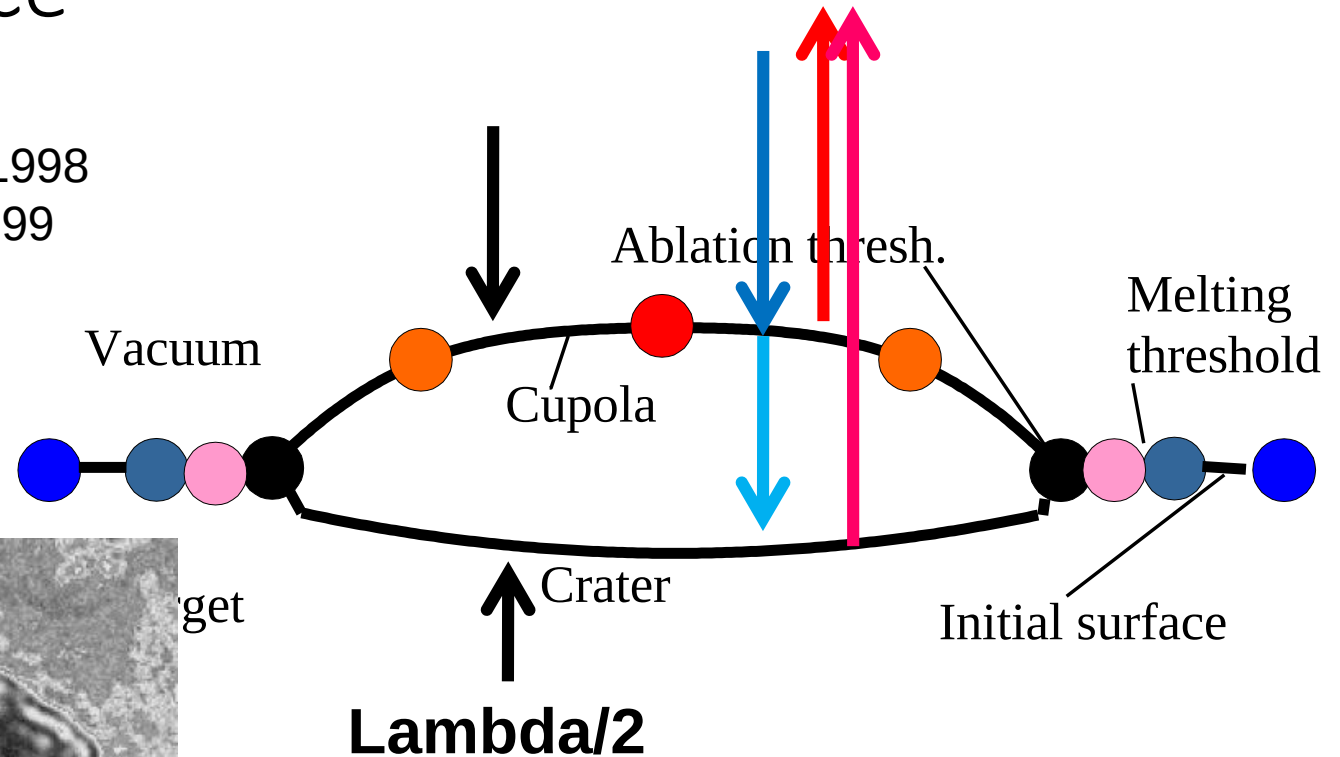
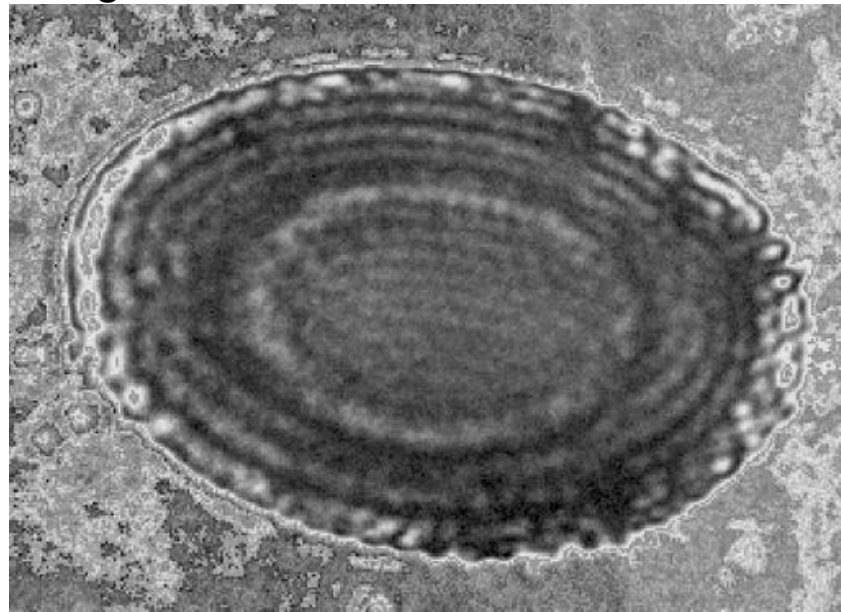
FIG. 1. Surface of a Si wafer after irradiation with a 120 fs laser pulse of 0.47 J/cm^2 . Frame size: $220 \times 300 \mu\text{m}$. Exposure time: 120 fs.

Newton rings = well-established proof that
spallation after a short pulse
indeed takes place

Sokoowski-Tinten et al., PRL 1998

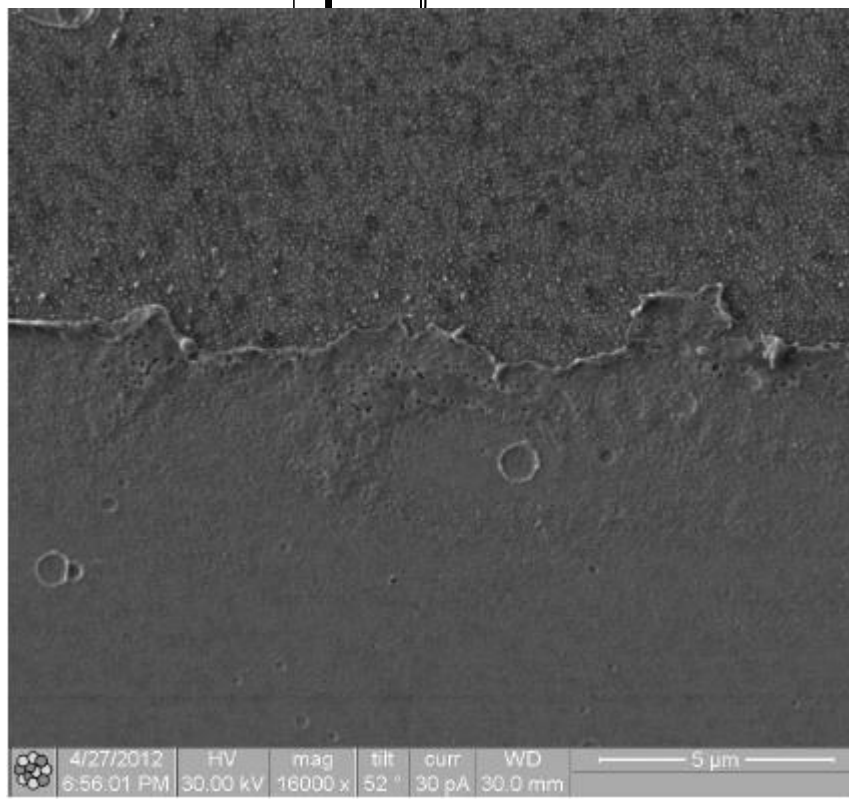
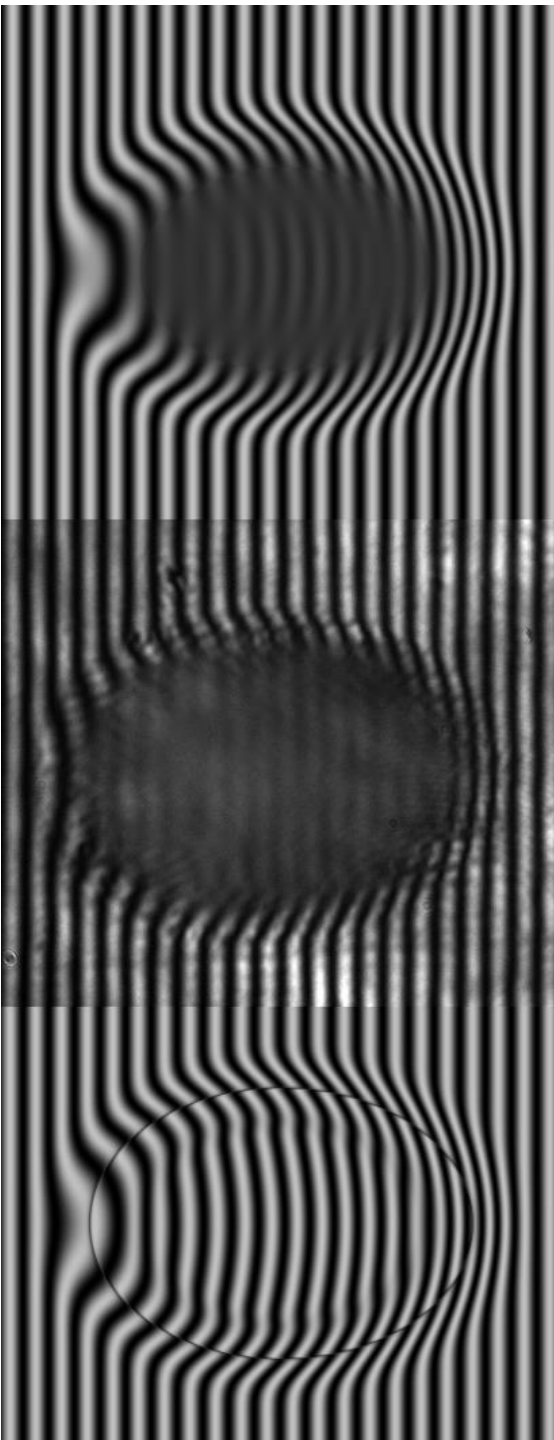
Inogamov et al., JETP Lett. 1999

Inogamov et al., JETP 2008

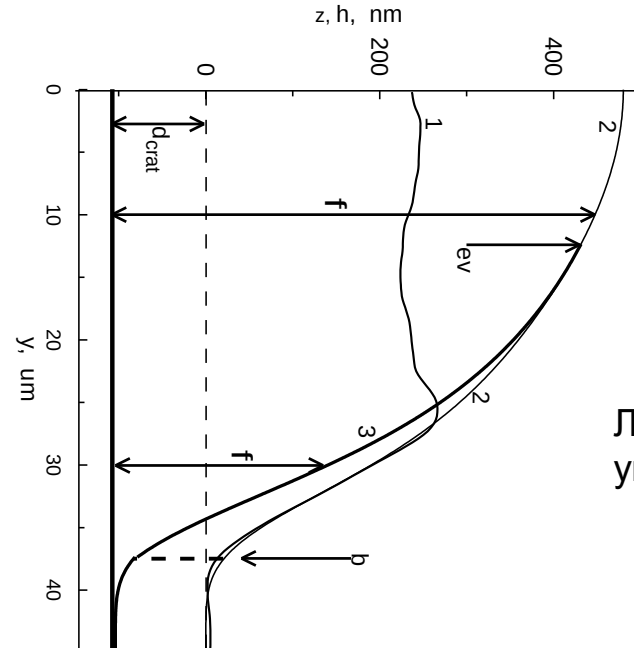


Remarkable observations have been done recently
scientists from KPSI found Newton rings
in X-rays !

The distance $\Lambda/2$ is very small for X-rays



Тантал



Лаб. М.Б.Аграната,
унив. Тампа, США

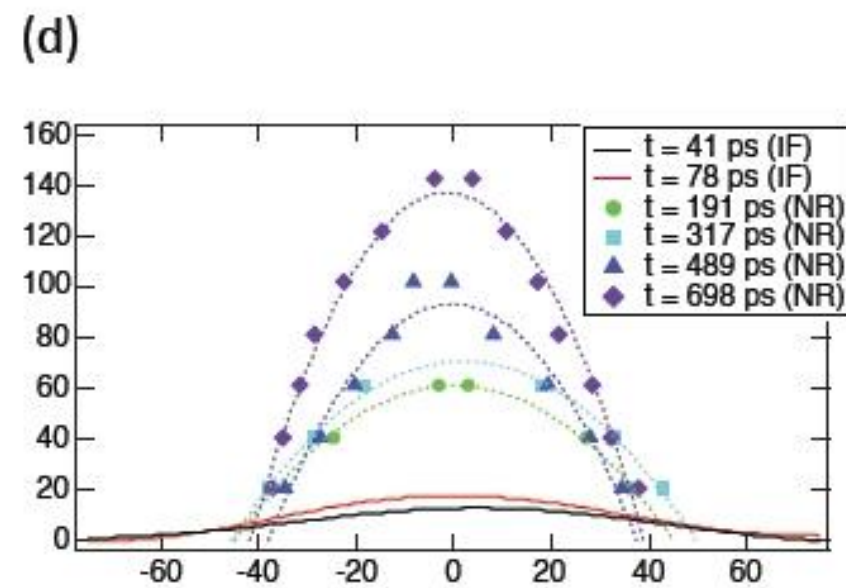
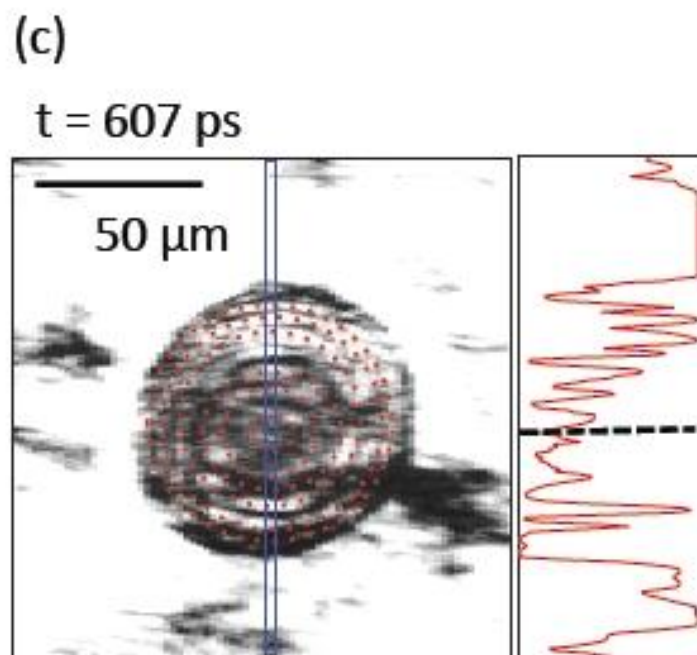
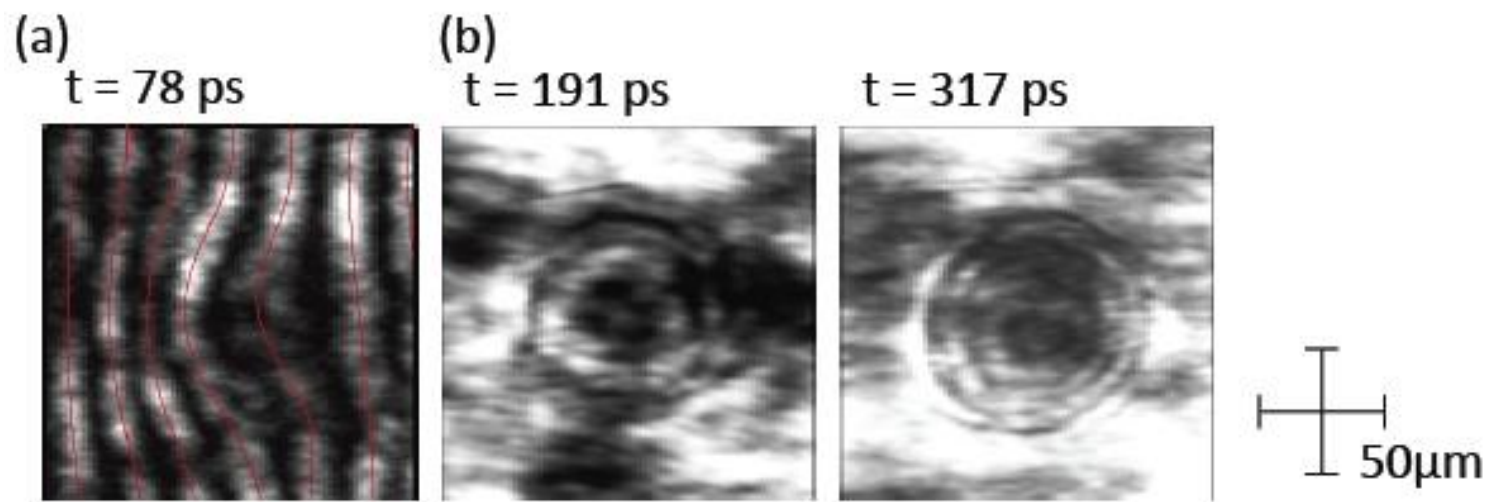
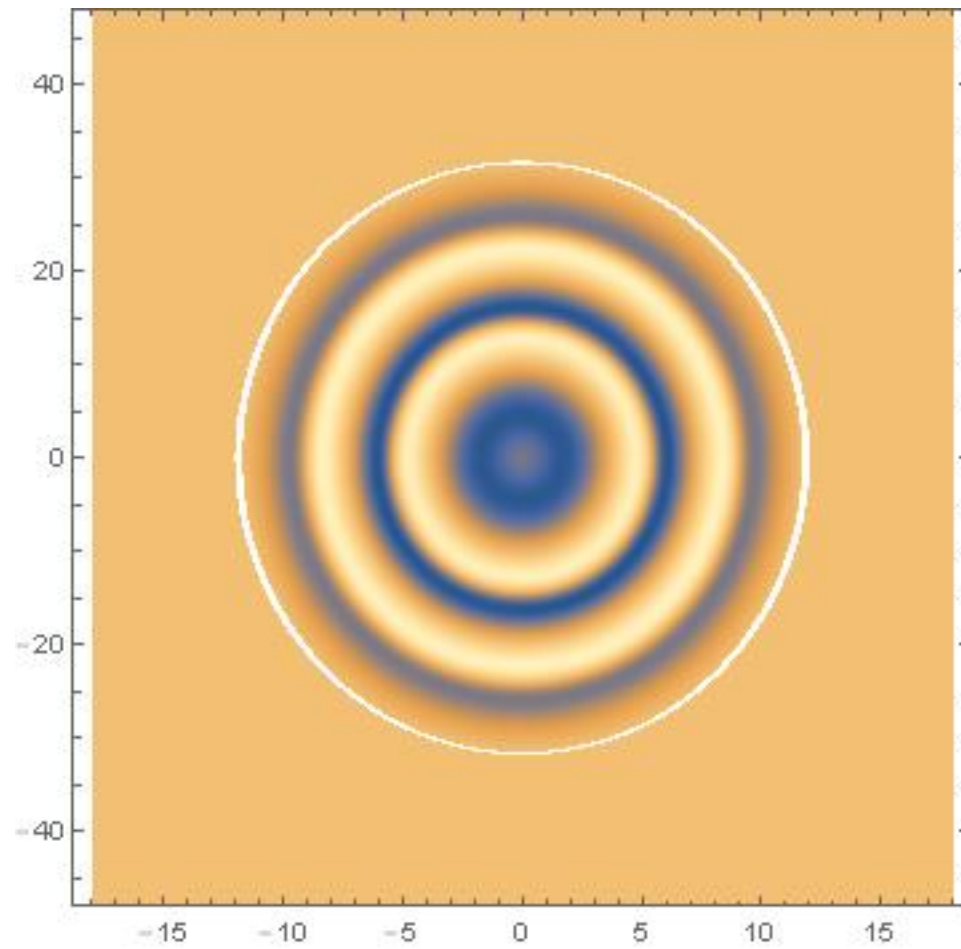
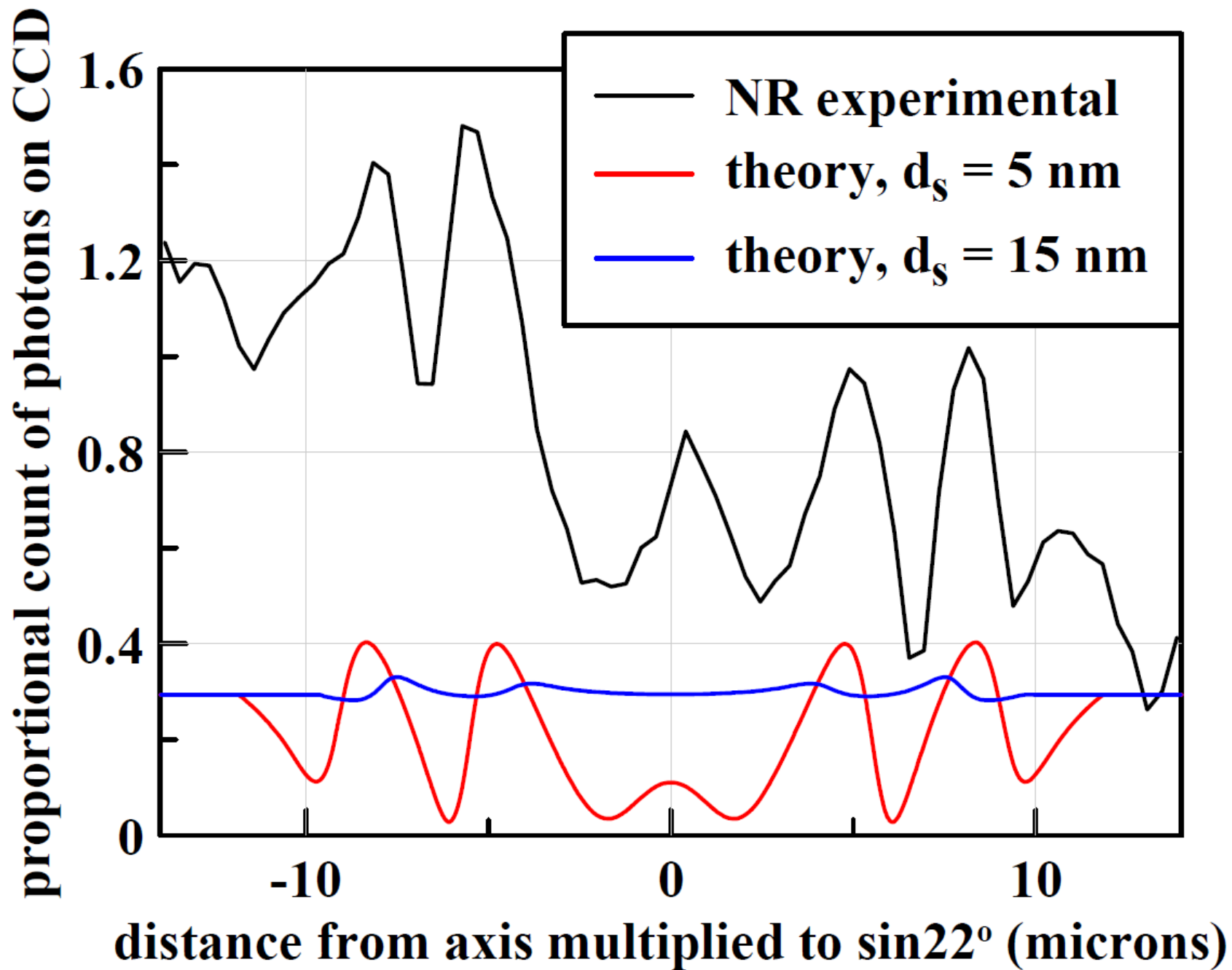


Fig. 2 Nishikino et al.





I could not understand why you put that for interferometry $t < 100$ ps. In your experimental figures interferometry images up to 1475 ps

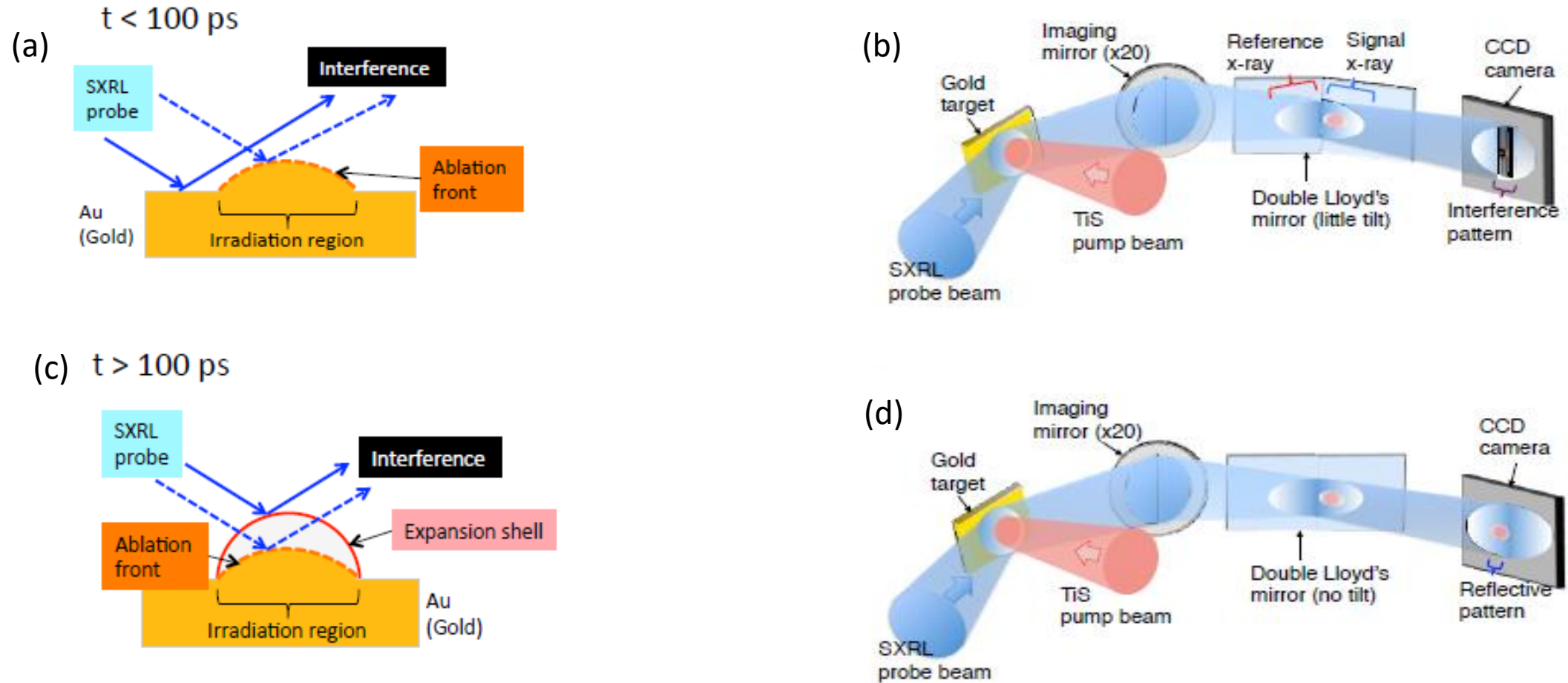
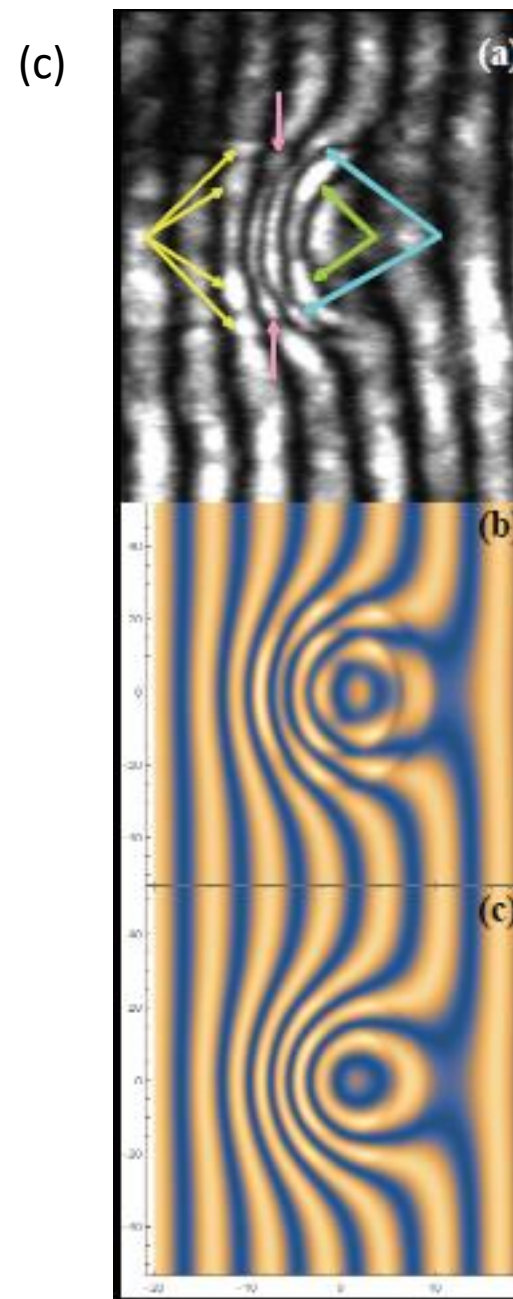
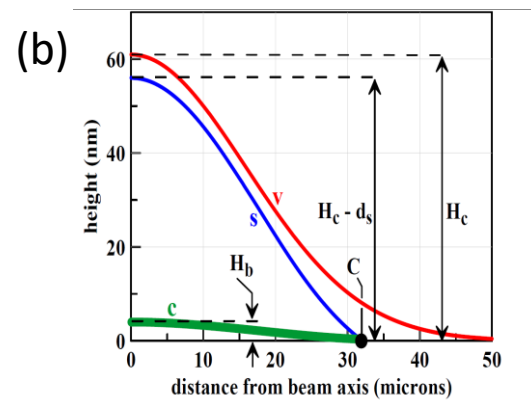
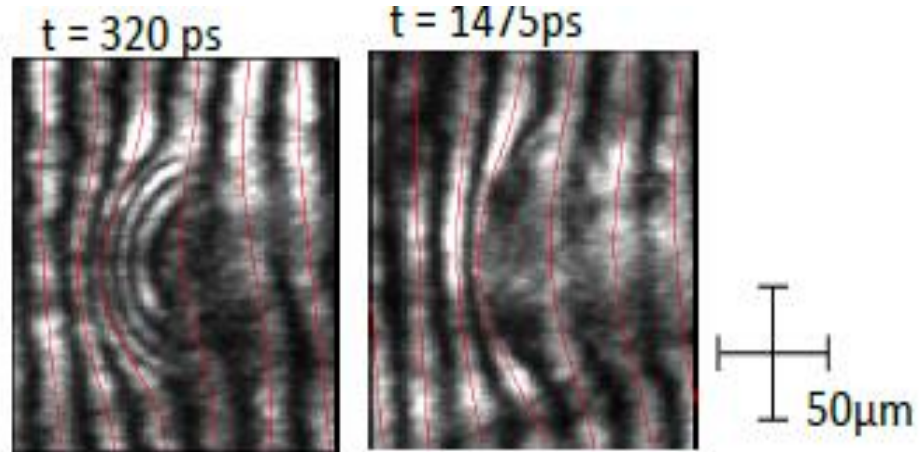
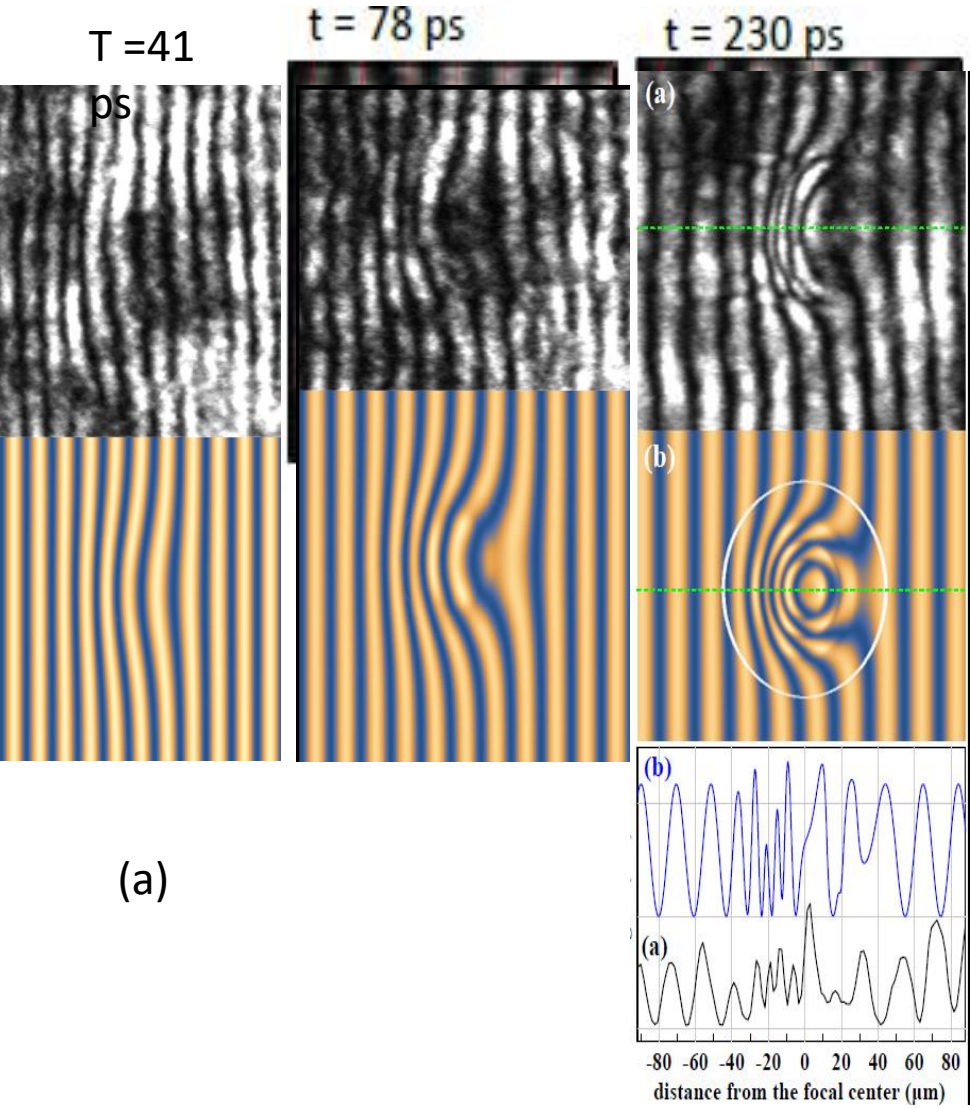
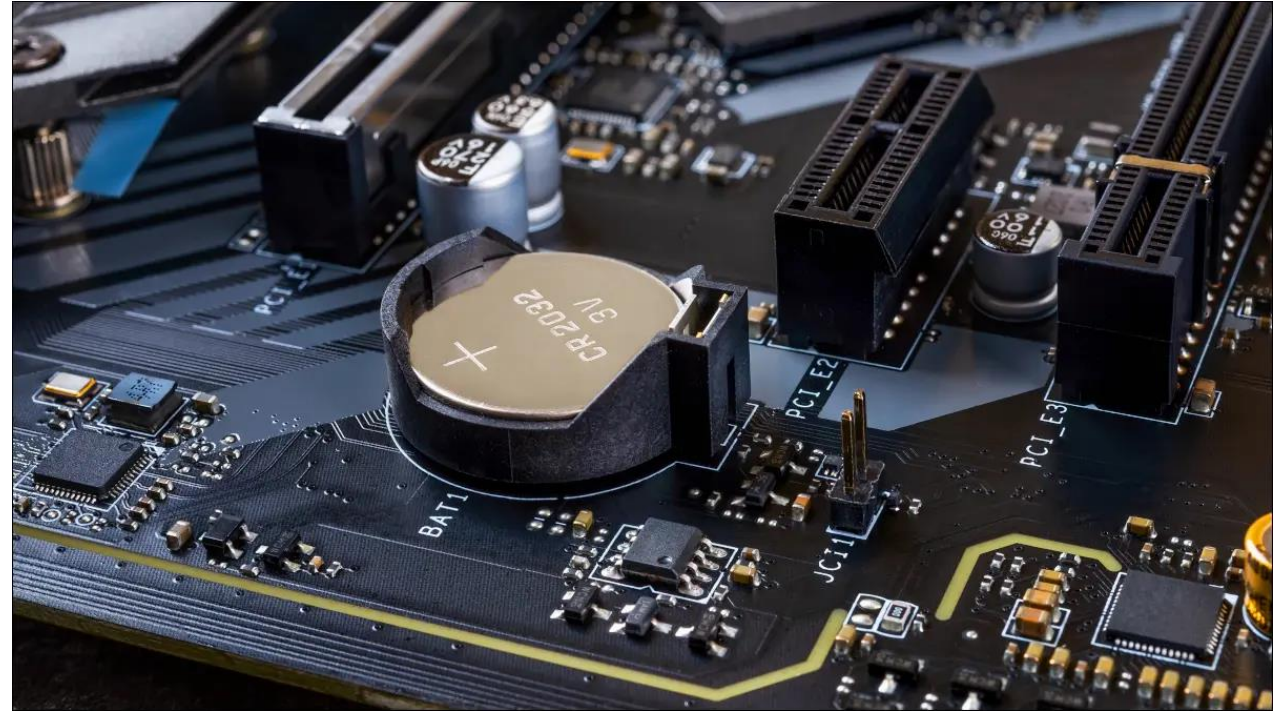


Fig.1. Principles and schematic view of the experimental set up of Ti:Sa laser pump and SXRL probing of ultrathin ablated shell expansion. (a) and (b) X-ray interferometry using double Lloyd's mirror and (c),(d) X-ray reflection imaging.



EUV / soft X-ray 100 eV



Изготовление ASML : ФОТОЛИТОГРАФИЯ

Многослойные зеркала, дробление капли олова, оловянная лампочка

Expansion and Fragmentation of a Liquid-Metal Droplet by a Short Laser Pulse

S. Yu. Grigoryev,^{1,2,*} B. V. Lakatosh,³ M. S. Krivokorytov,^{3,4,5} V. V. Zhakhovsky,^{1,2}
S. A. Dyachkov,^{1,2,3,6} D. K. Ilnitsky,^{1,2} K. P. Migdal,^{1,2} N. A. Inogamov,^{1,2} A. Yu. Vinokhodov,⁵
V. O. Kompanets,⁴ Yu. V. Sidelnikov,⁴ V. M. Krivtsun,^{4,5} K. N. Koshelev,^{4,5} and V. V. Medvedev^{3,4}

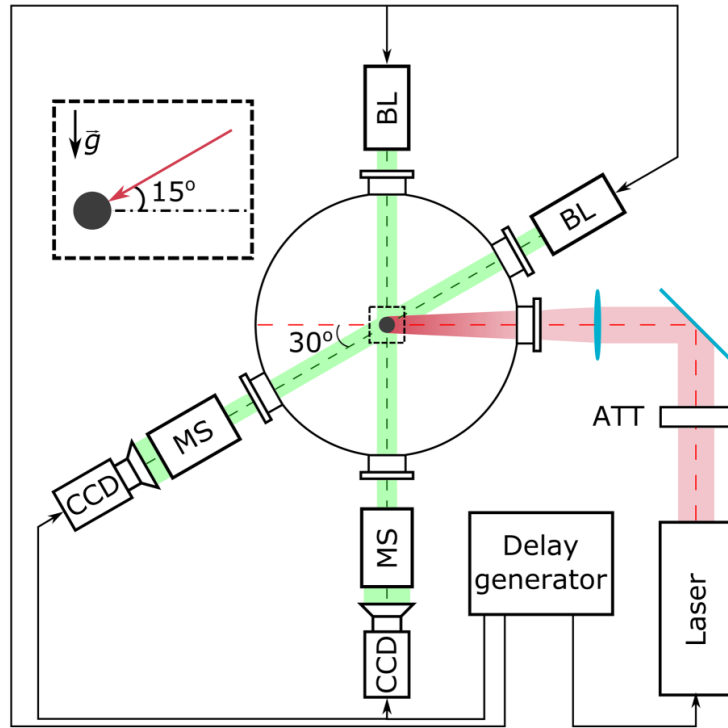


FIG. 1. The scheme of the experimental setup for the study of

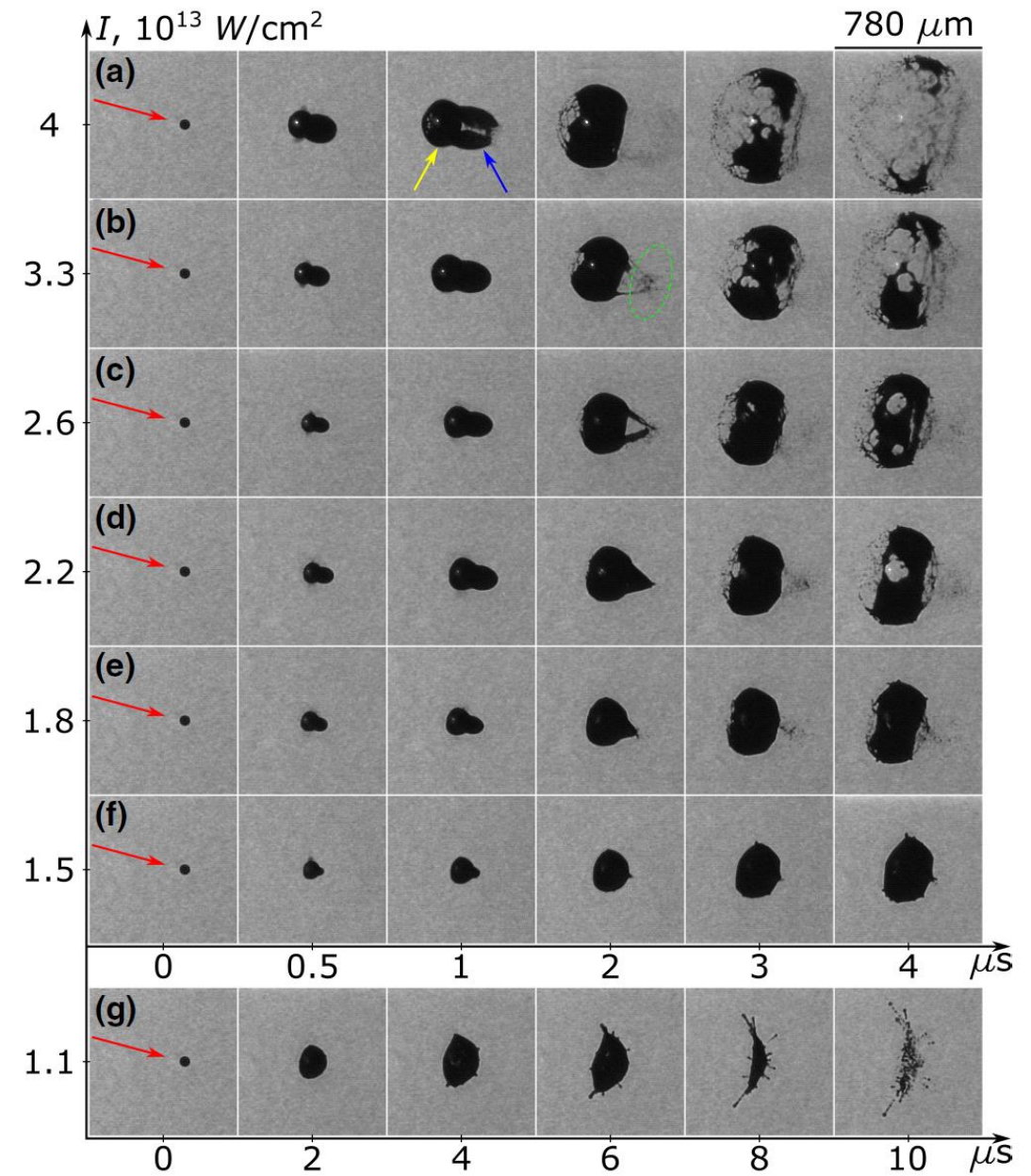
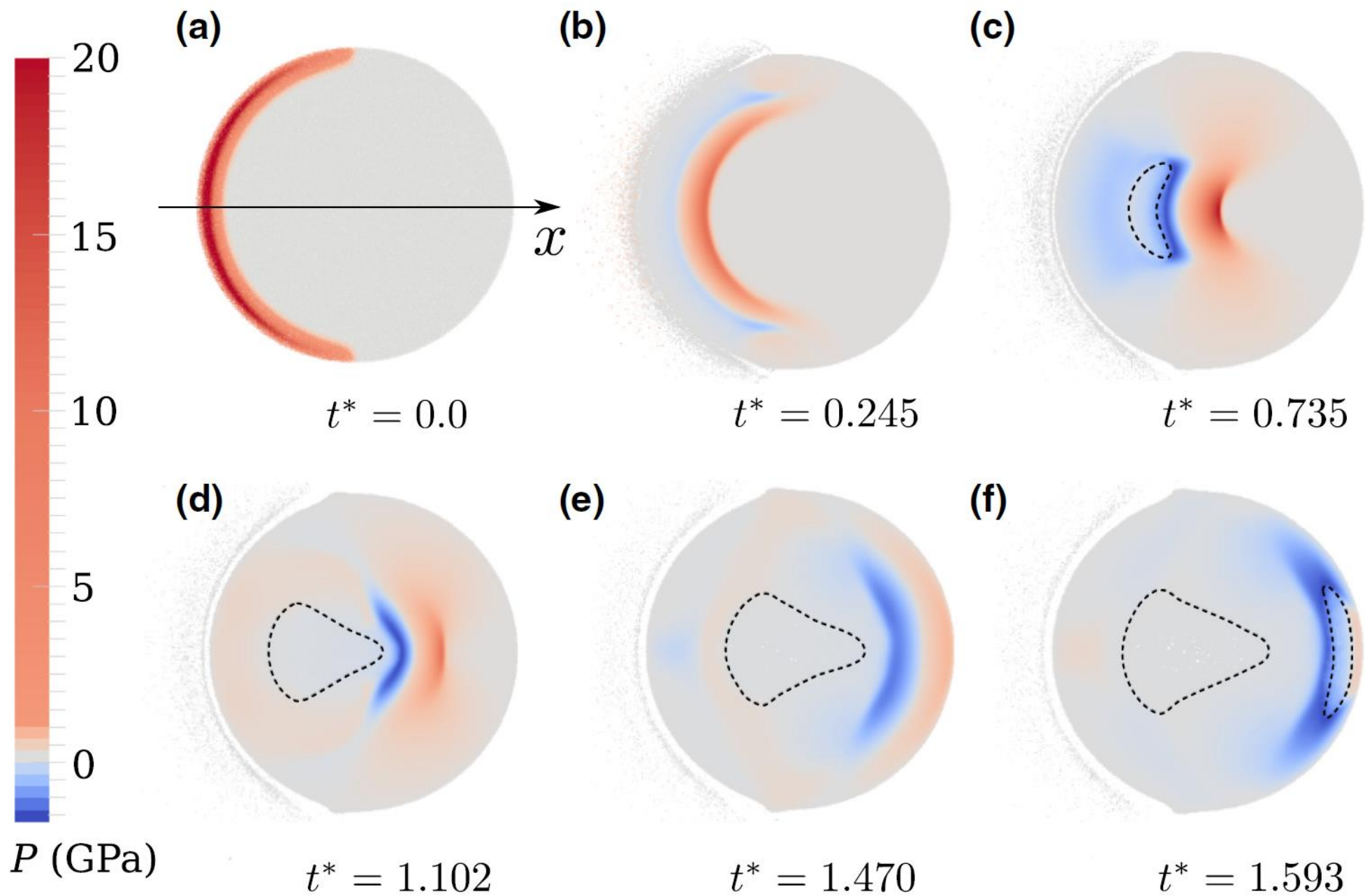


FIG. 2. Side views of the evolution of the target shape for the different laser-pulse intensities presented on the vertical axis. The horizontal axes show the time delays relative to the laser pulse



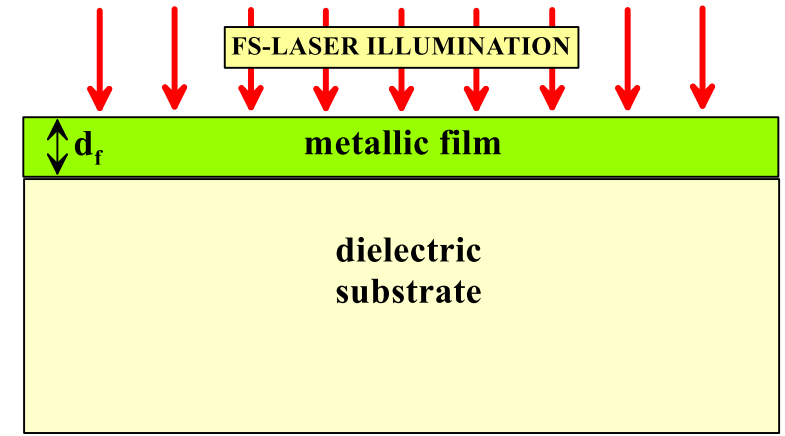
Pressure maps within a thin cross section of a droplet, obtained at dimensionless times $t^* = ct/R$. The laser pulse is initially located at $x = 1$ for $t = 0$ and moves towards the center of the droplet [27]. (c) The initial interface is at $x = 1$.

Динамика тонких пленок – 1

ОптоАкустика: трансдьюсеры

1.1-Applications in optoacoustics

- We send the fs-laser pulse onto a film above substrate
- There are two cases: (1) $d_f < d_T$ and (2) $d_f > d_T$
- The film oscillates as whole in the case (1) with a period $2 d_f/c_s$



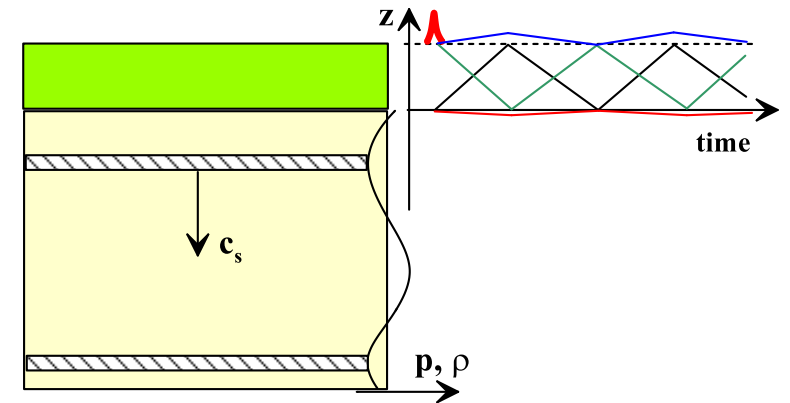
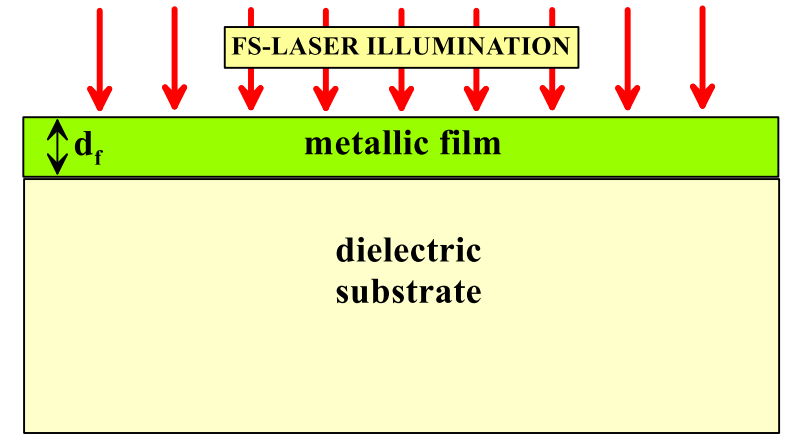
Khokhlov et al., J.Phys.: Conf. Ser. **653** (2015) 012003

Khokhlov et al., J.Phys.: Conf. Ser. **774** (2016) 012100

Khokhlov et al., [AIP Conf. Proc.](#) **1793**, 100038 (2017)

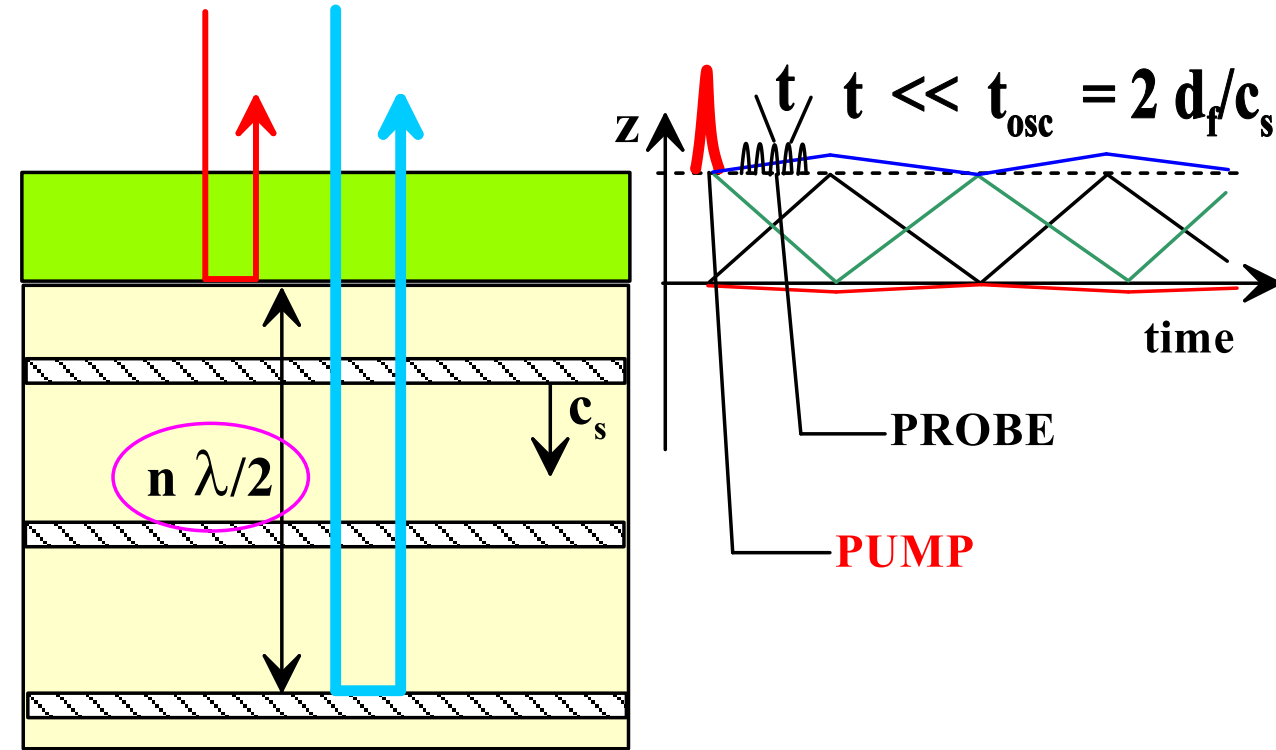
1.1-Applications in optoacoustics

- We send the fs-laser pulse onto a film above substrate
- There are two cases: (1) $d_f < d_T$ and (2) $d_f > d_T$
- The film oscillates as whole in the case (1) with a period $2 d_f/c_s$
- These oscillations send acoustics wave into the substrate.
- Oscillations decay in time due to sending an acoustic wave into substrate



1.1-Applications in optoacoustics

- Pump-probe technique
- Measurements of reflectivity
- (1) oscillations of a film change its reflectivity
- (2) interference of two reflected rays - the lambda in half condition: $\lambda/2$



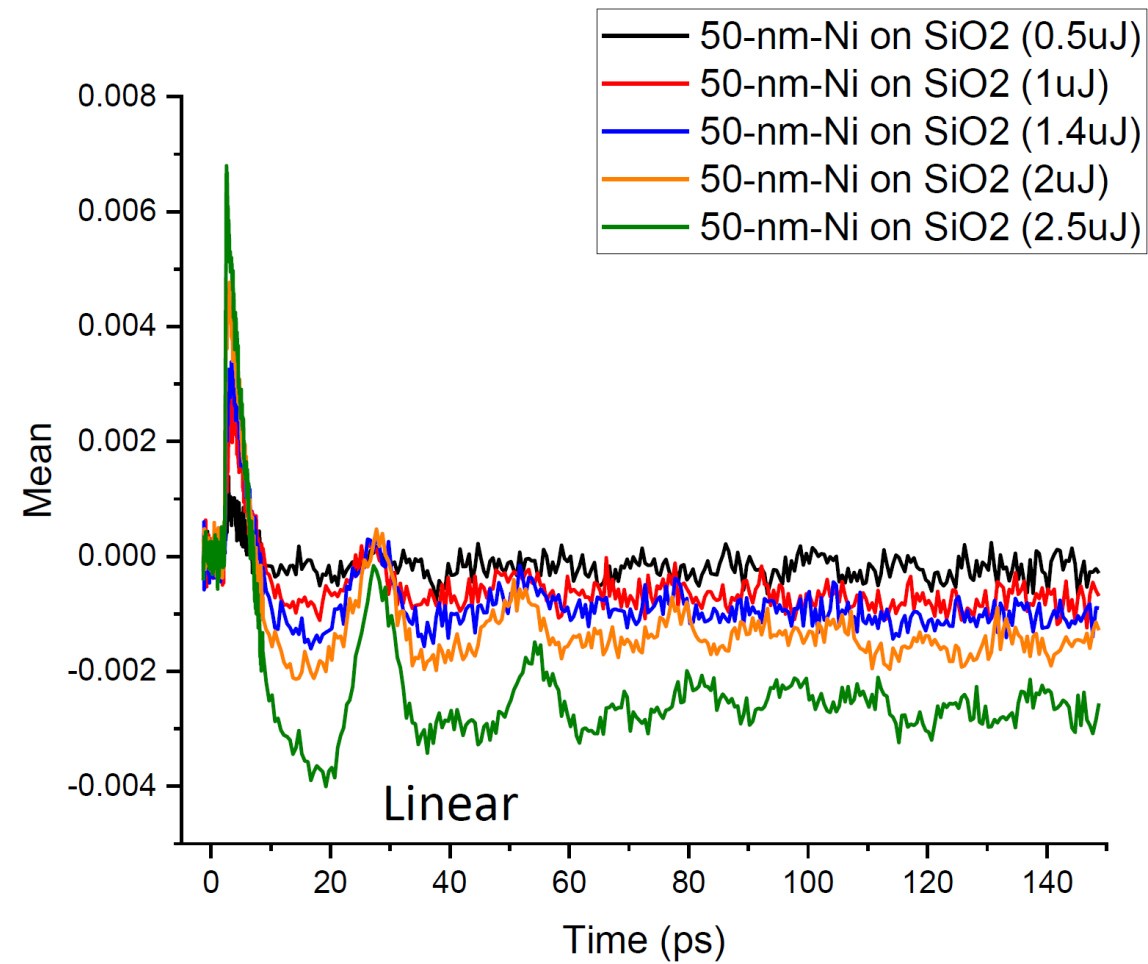
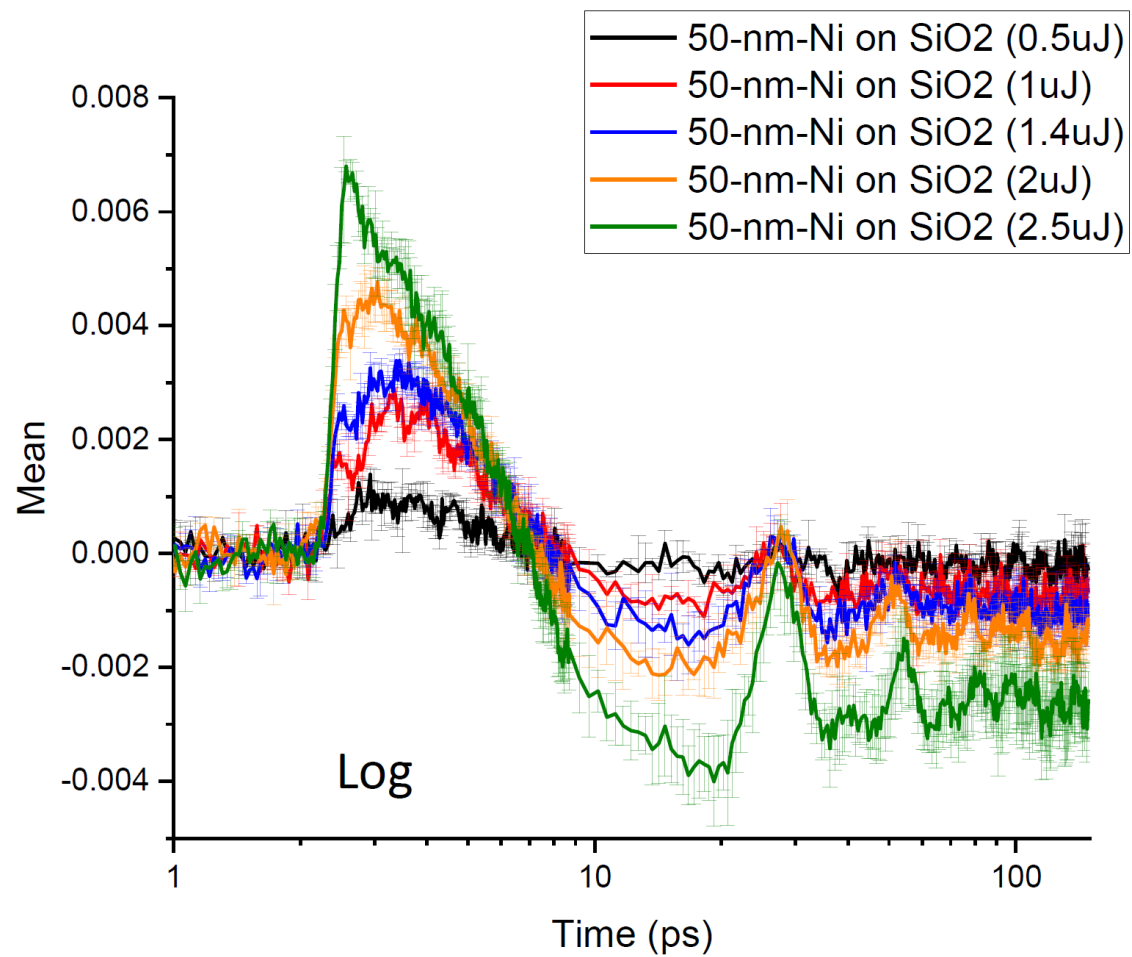
- (1) The phase and amplitude of film oscillations depend on the rapid rise of electron pressure - we can check the two-temperature $T_e \gg T_i$ equation of state of the condensed medium
- (2) Thus we can see what is going on in the volume⁴²

1.1-Applications in optoacoustics

- The example of multilayered mirrors is an important one. Such mirrors are designed to work with EUV/soft X-rays $\lambda = 10\text{-}40\text{ nm}$.
- OptoAcoustics of a multilayer target.
- Jointly with the JIHT lab: Agranat, Ashitkov, Romashevskiy, Sitnikov et al.



50-nm-Ni/glass

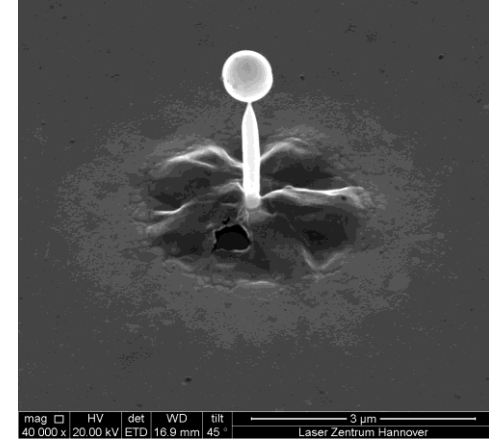


Динамика тонких пленок – 2

метаповерхности

Создание рельефов на поверхности nanostructuring

- Объемные и пленочные мишени
- Начнем с пленок
- Отслоение пленок от подложки
- Большие и малые пятна фокусировки
- Торможение отлета отслоившейся пленки
поверхностным натяжением
- В случае пятен большого диаметра остановить
отлет можно только при очень малой скорости
отлета
- Интересным является случай малых пятен, когда
капиллярные силы могут остановить улетающую
пленку даже при значительных скоростях отлета



Создание рельефов на поверхности nanostructuring

- Объемные и пленочные мишени
- []
- Отслоение пленок от подложки
- Большие и малые пятна фокусировки

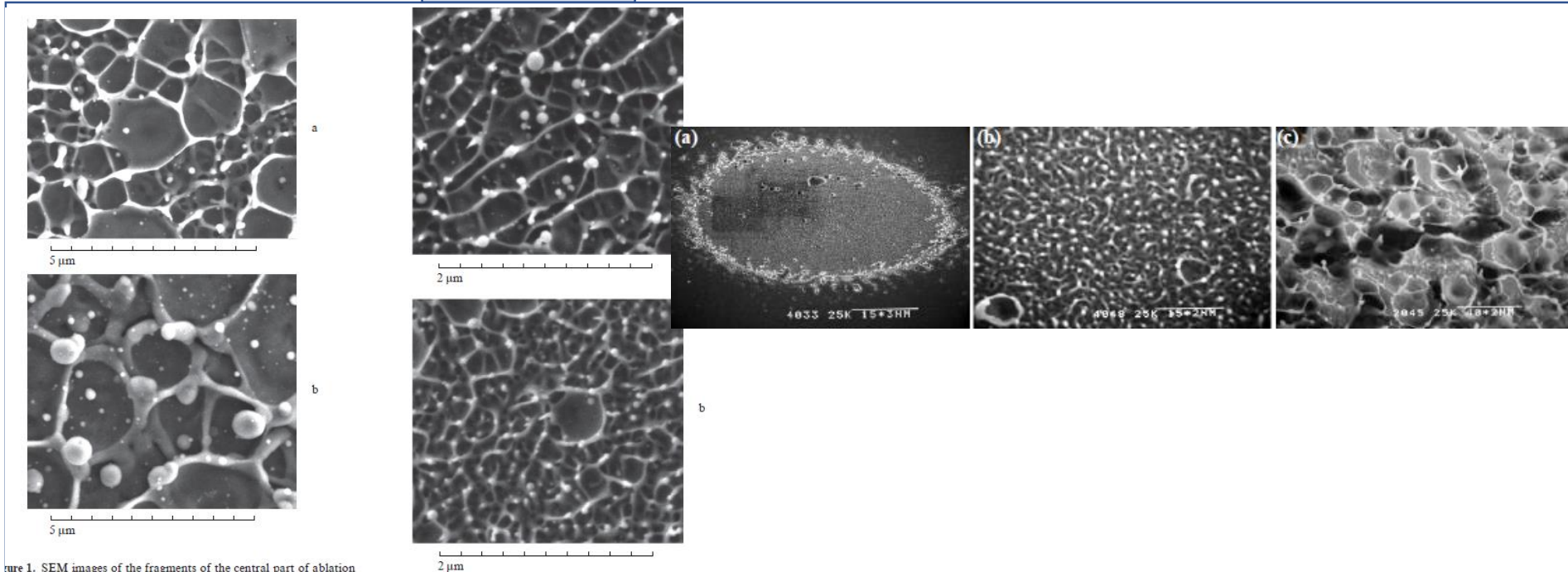
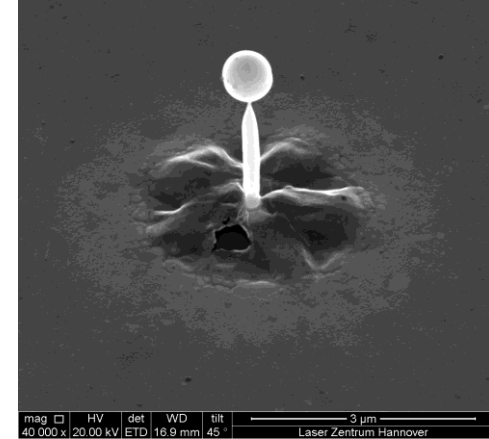


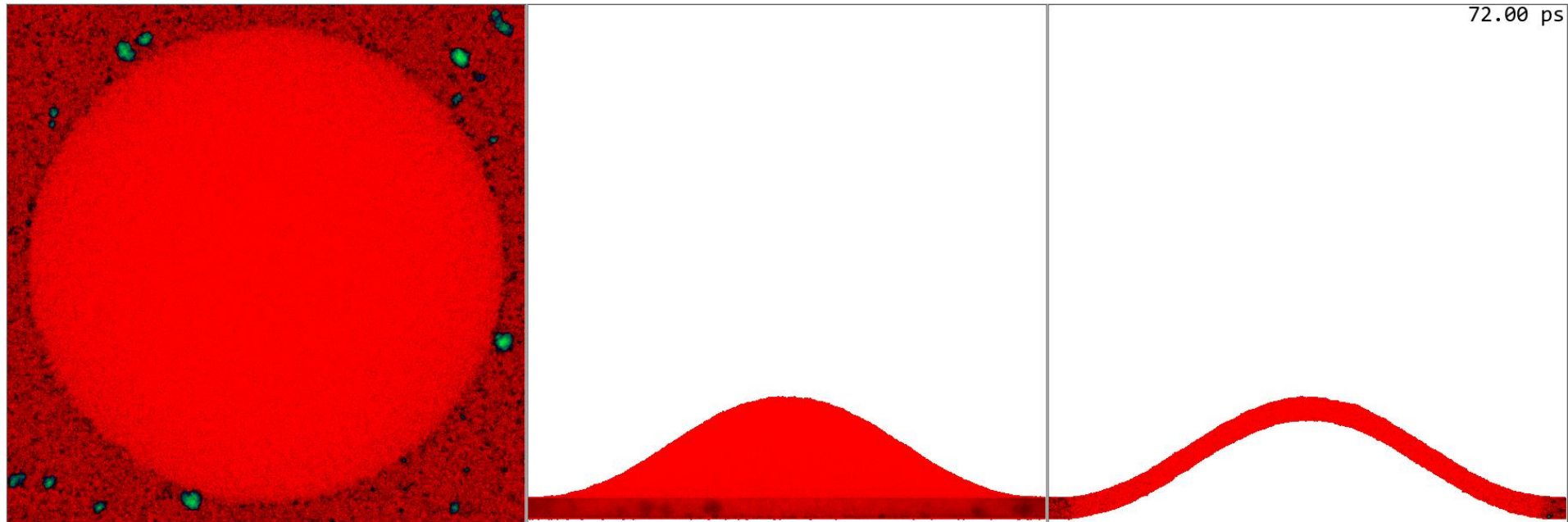
Figure 1. SEM images of the fragments of the central part of ablation craters formed on the surface of an aluminium sample after exposure to laser pulse with a varying energy density at $FI/F_s =$ (a) 2 and (b) 3.6.

Figure 3. SEM images of the central part of craters on (a) nickel and (b) tantalum at $FI/F_s = 2$.

Управление формой за счет энергии импульса:
слабые-умеренные-сильные =
купол---купол со струей---струя+капля---нанокороны — отверстие в пленке

твердая фаза = зеленым --- расплав = красным

Борьба: **капиллярность** против **кристаллизации**



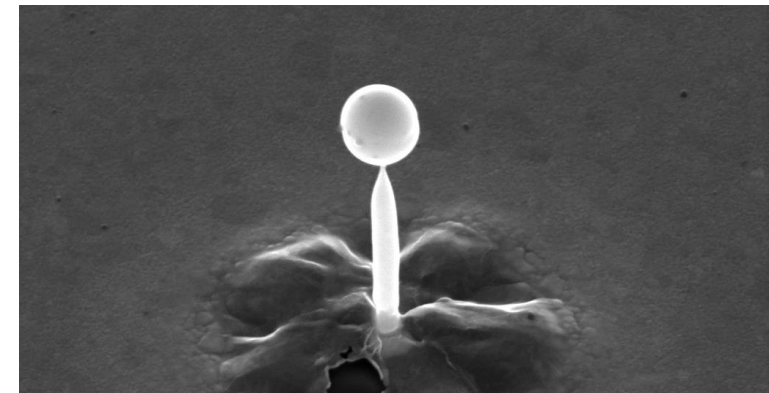
ИНА, Жаховский, Письма ЖЭТФ, т.100, с.6 (2014)

ИНА и др., ЖЭТФ, т.147, с.20 (2015)

INA et al., Appl. Phys. A 122:432 (2016)

INA et al., Nanoscale Res. Lett. 11:177 (2016)

Анисимов, ИНА и др., Квант. Электроника т.47, с.509 (2017)



Let us write the equation of motion of the film in dimensionless form:

$$\frac{\partial^2 \hat{r}}{\partial \hat{t}^2} = -C \frac{\partial \hat{z}}{\partial \hat{a}}, \quad \frac{\partial^2 \hat{z}}{\partial \hat{t}^2} = C \frac{\partial \hat{r}}{\partial \hat{a}}, \quad (15)$$

where

$$\hat{r}' = \frac{\partial \hat{r}}{\partial \hat{a}}, \quad \hat{z}' = \frac{\partial \hat{z}}{\partial \hat{a}}, \quad C = \frac{1}{2} \left(\frac{\hat{r}}{\hat{a} \hat{R}} + \frac{\hat{z}'}{k \hat{a}} \right),$$

$$\hat{R} = \frac{k^3}{\hat{z}'' \hat{r}' - \hat{r}'' \hat{z}'}, \quad k = \sqrt{\hat{r}'^2 + \hat{z}'^2}.$$

Let us write the equation of motion in dimensionless form:

$$\frac{\partial^2 \hat{r}}{\partial \hat{t}^2} = -C \frac{\partial \hat{z}}{\partial \hat{a}}, \quad \frac{\partial^2 \hat{z}}{\partial \hat{t}^2} = C \frac{\partial \hat{r}}{\partial \hat{a}},$$

where

$$\hat{r}' = \frac{\partial \hat{r}}{\partial \hat{a}}, \quad \hat{z}' = \frac{\partial \hat{z}}{\partial \hat{a}}, \quad C = \frac{1}{2} \left(\frac{\hat{r}}{\hat{a} \hat{R}} - \right.$$

$$\hat{R} = \frac{k^3}{\hat{z}'' \hat{r}' - \hat{r}'' \hat{z}'}, \quad k = \sqrt{\hat{r}'^2 + \hat{z}'^2}$$

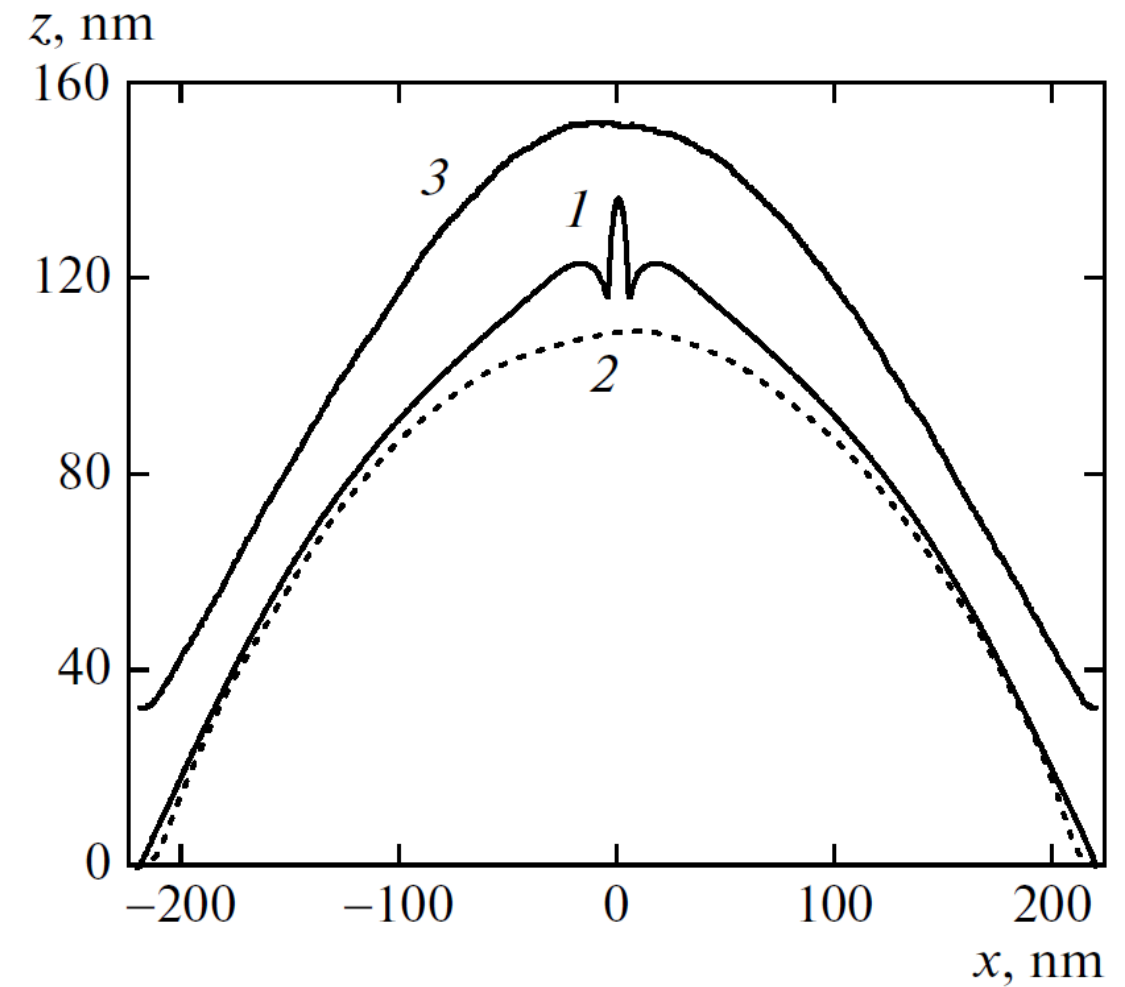


Fig. 28. Comparison of results of MD computation (curves 2 and 3) and model (17) (curve 1); see Fig. 16. Parameters of MD computations: thick film of initial thickness $h = 32$ nm, $\hat{V}_o = 0.776379$. Dimensionless time $t = 1.89$ ($t = 6.47$ ns) is used so that this figure can be compared with Fig. 27.

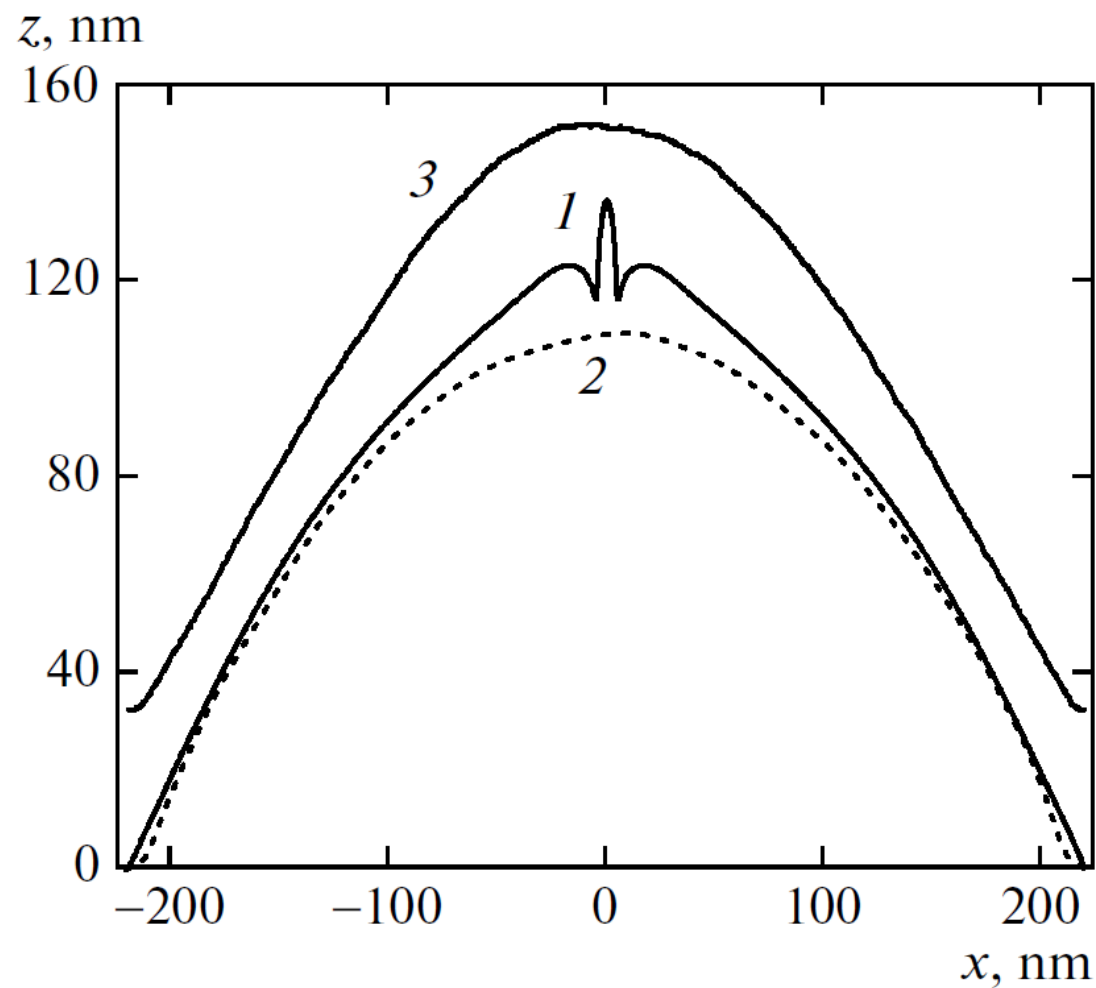
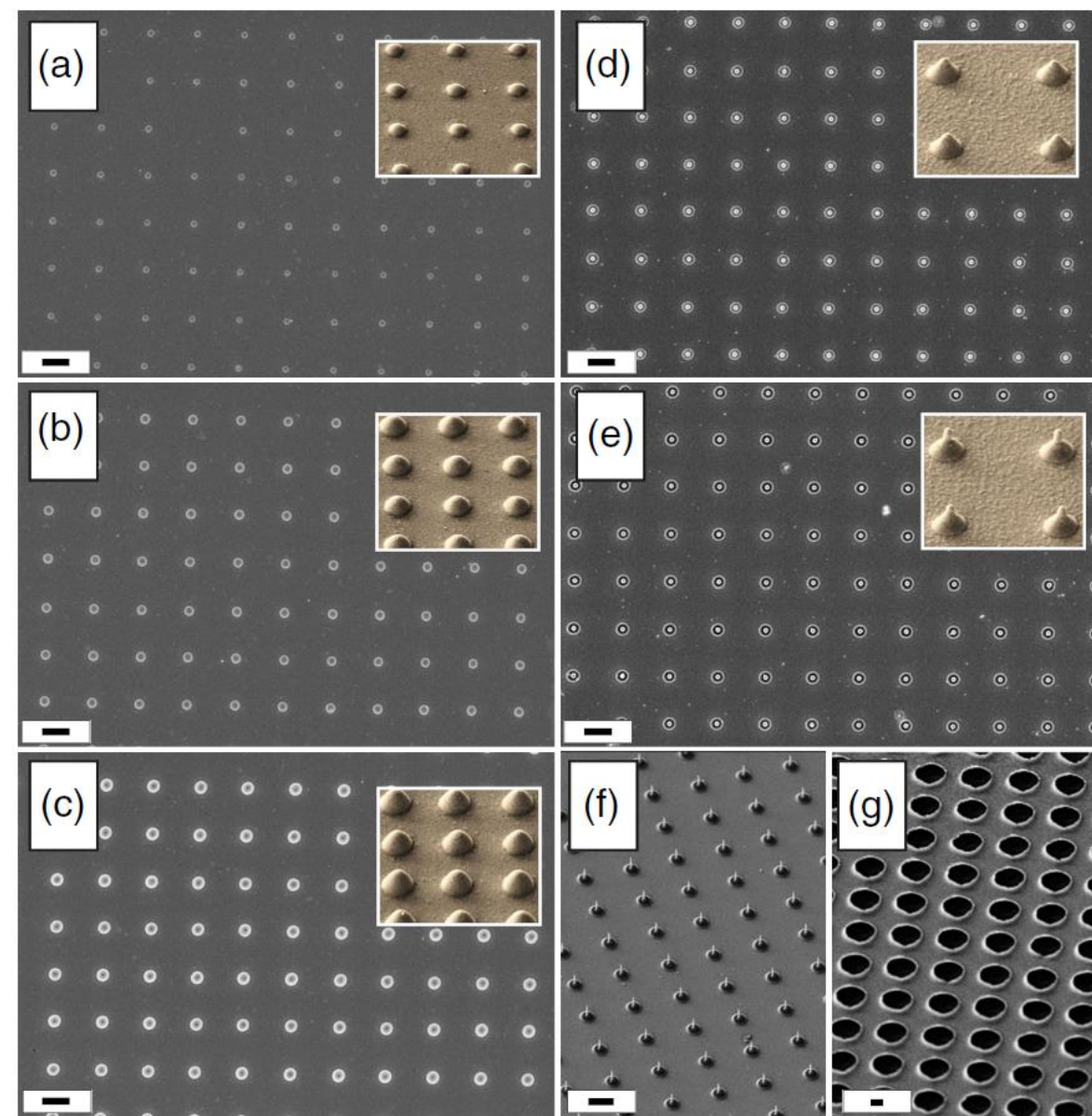


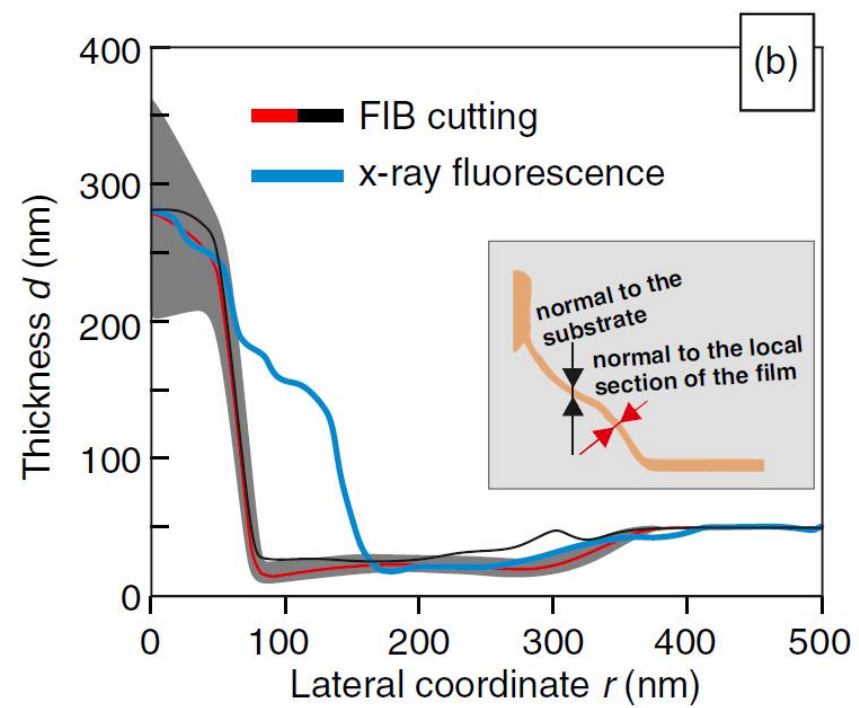
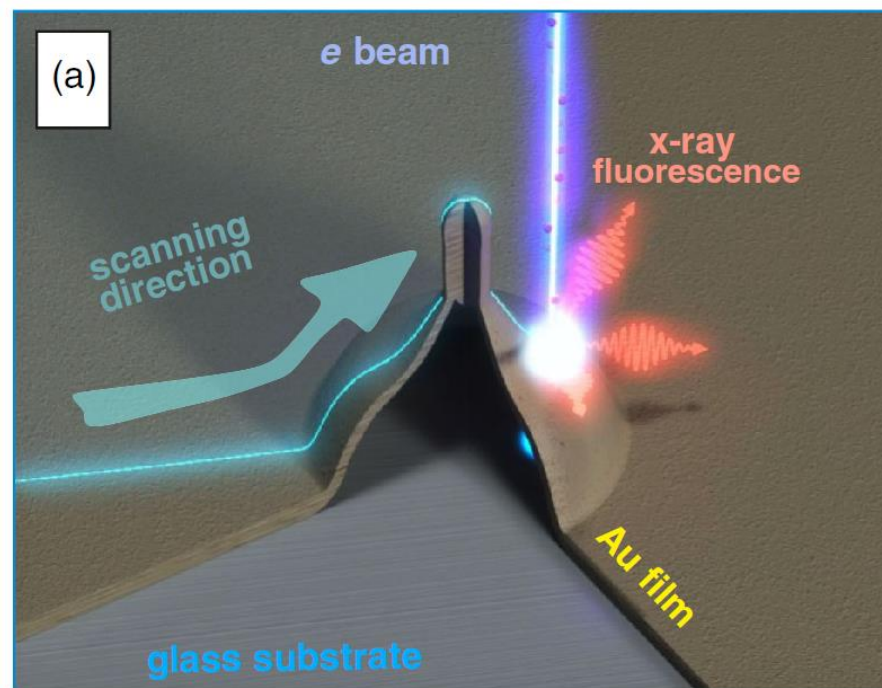
Fig. 28. Comparison of results of MD computation (curves 2 and 3) and model (17) (curve 1); see Fig. 16. Parameters of MD computations: thick film of initial thickness $h = 32$ nm, $\hat{V}_o = 0.776379$. Dimensionless time $t = 1.89$ ($t = 6.47$ ns) is used so that this figure can be compared with Fig. 27.

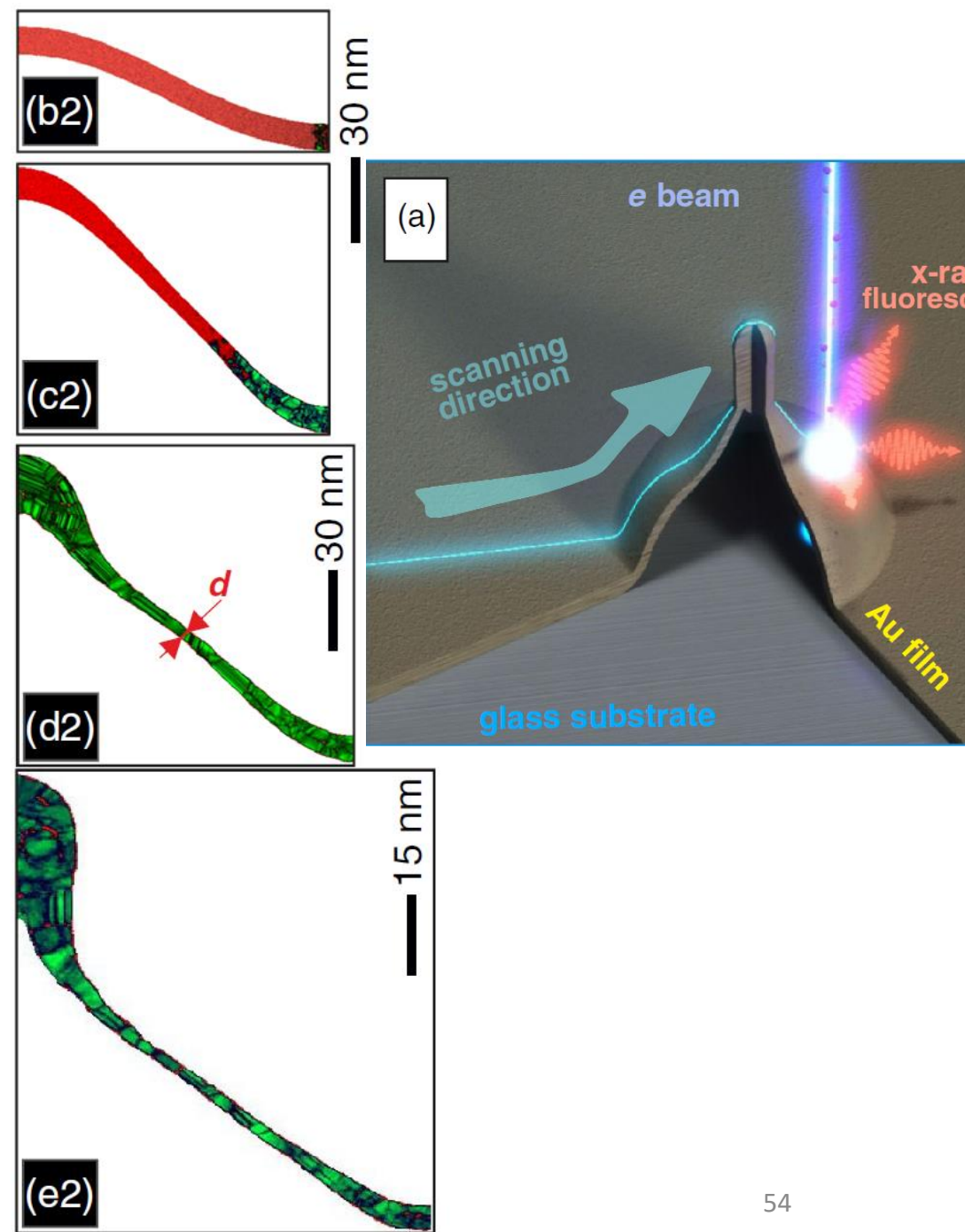
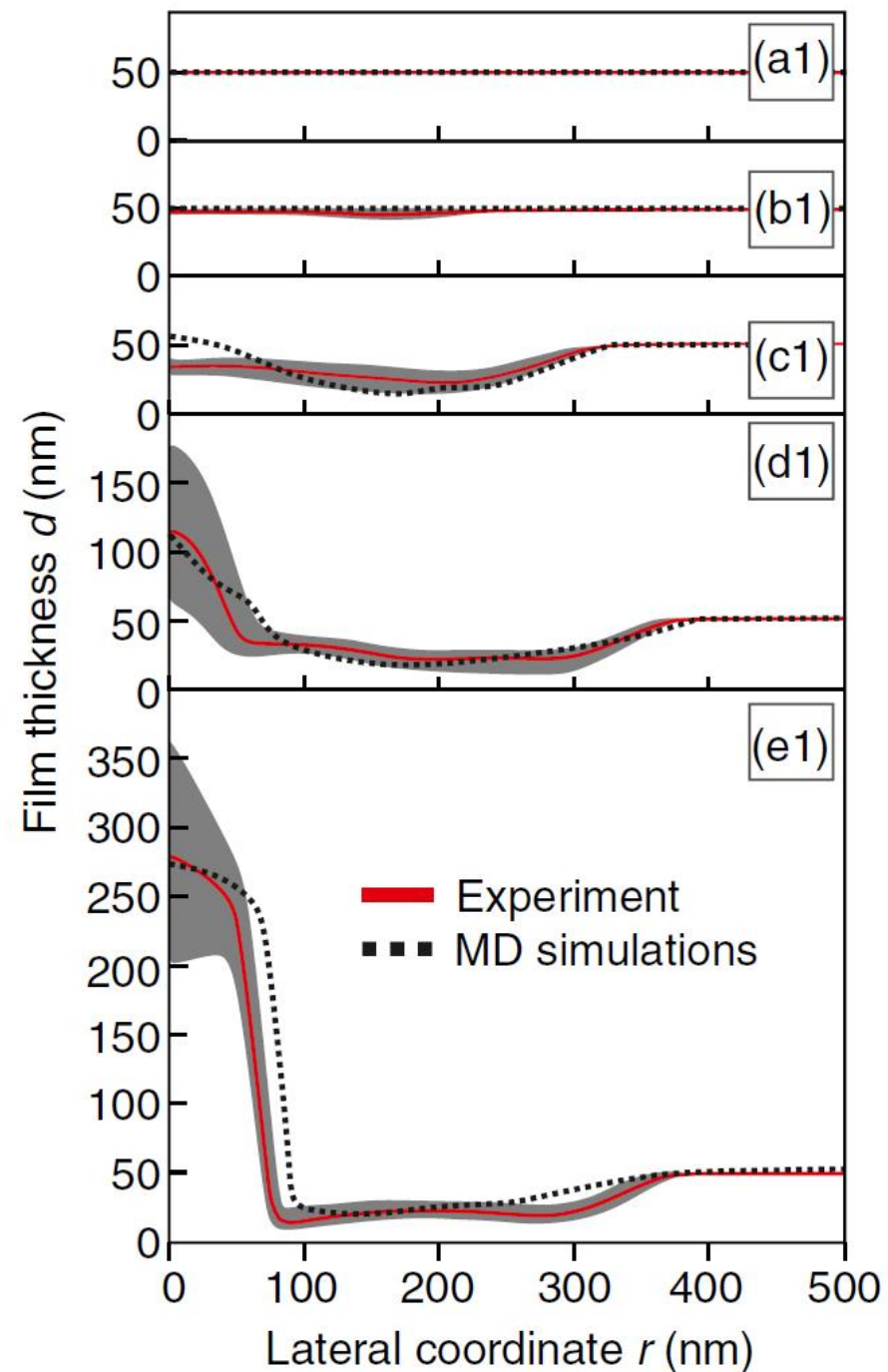
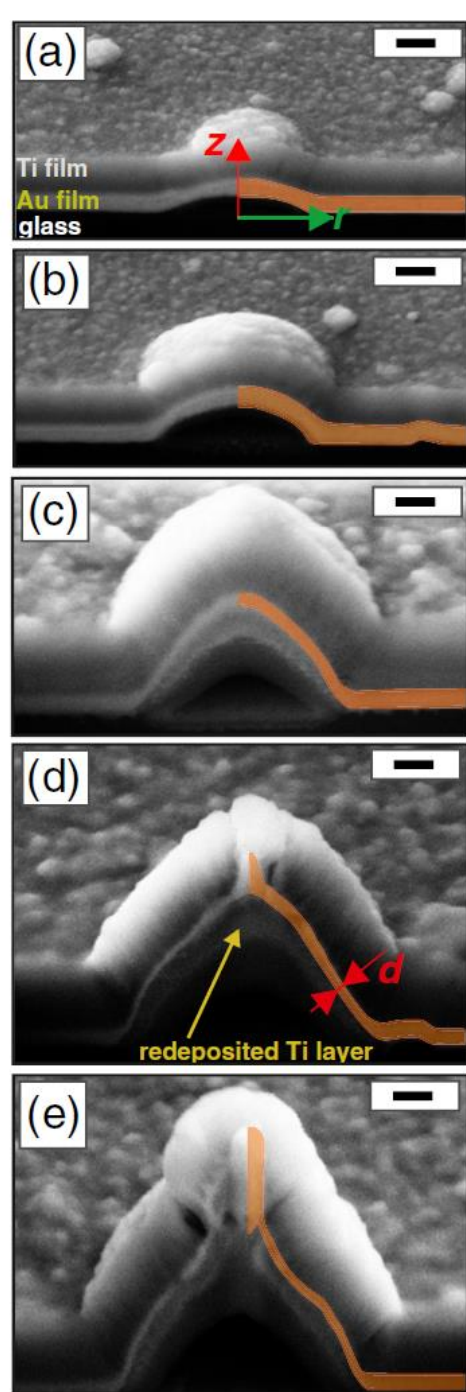
Джет и вращение

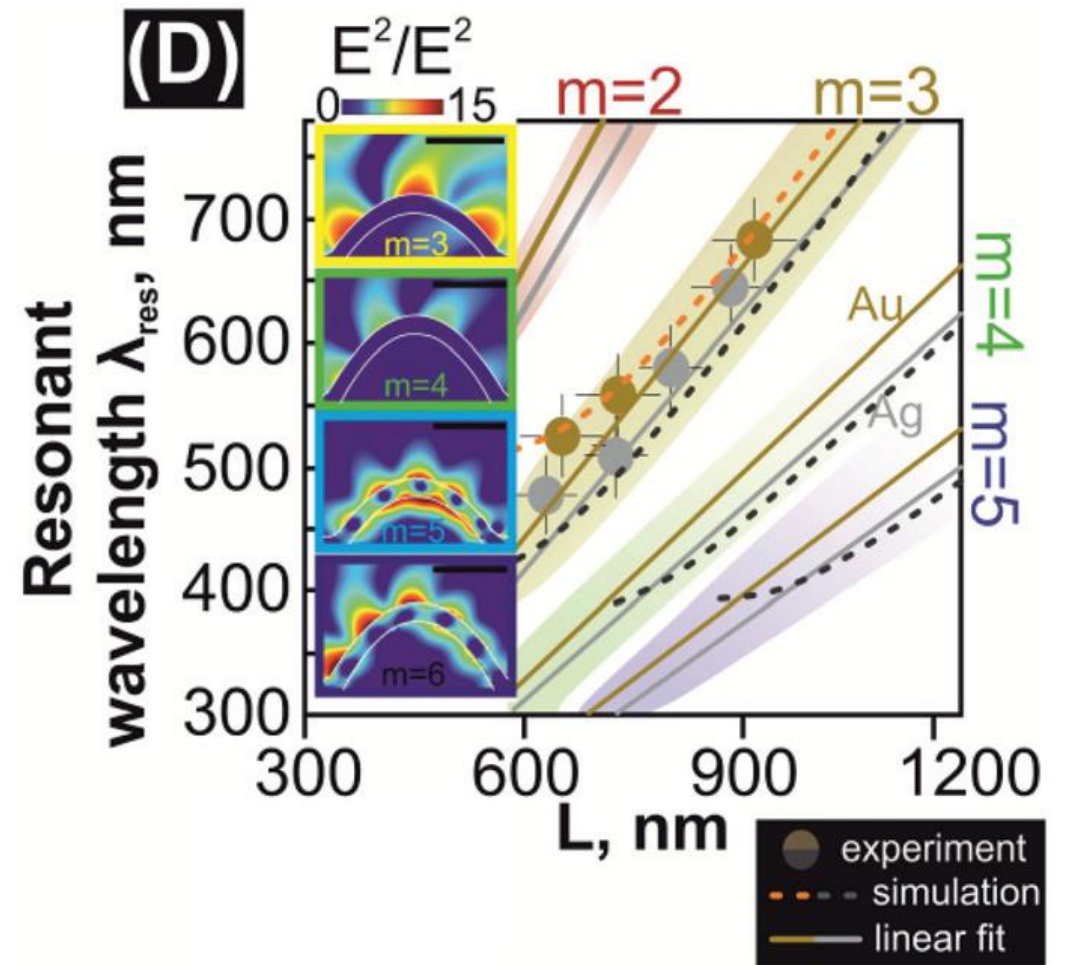
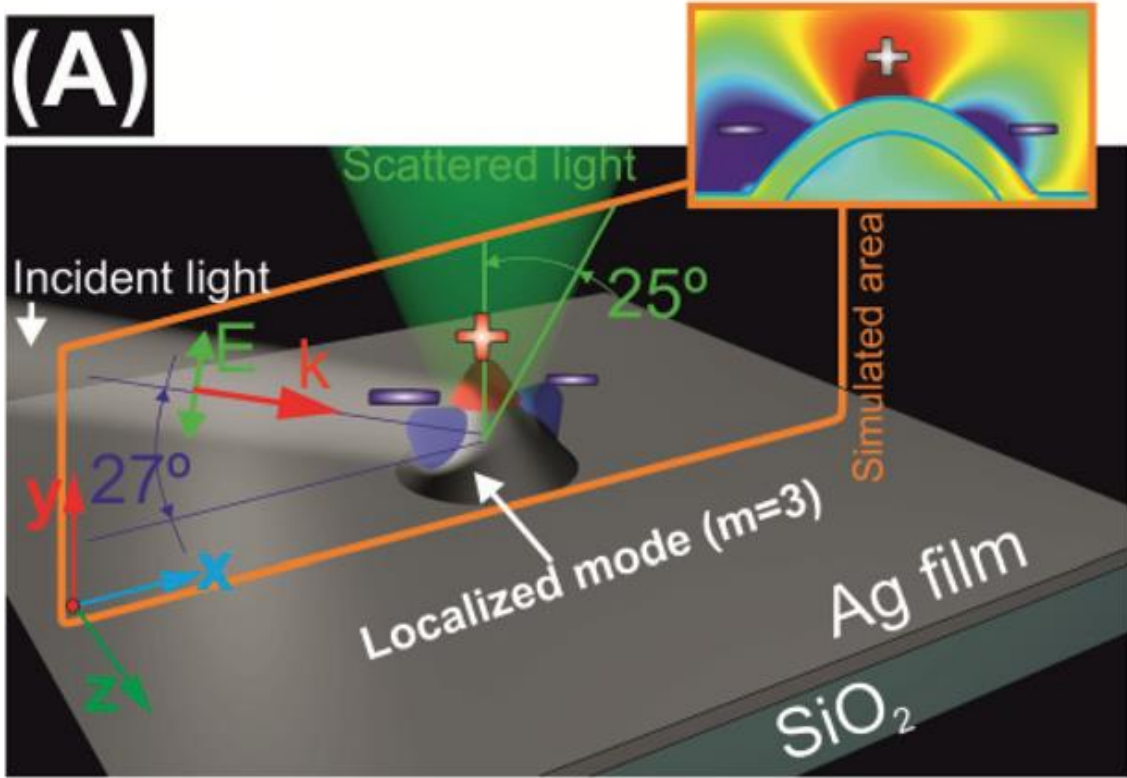


Laser-Induced Translative Hydrodynamic Mass Snapshots: Noninvasive Characterization and Predictive Modeling via Mapping at Nanoscale

X. W. Wang,¹ A. A. Kuchmizhak,^{1,2,3,*} X. Li,¹ S. Juodkazis,^{1,4} O. B. Vitrik,^{2,3} Yu. N. Kulchin,³ V. V. Zhakhovsky,^{5,6}
P. A. Danilov,^{3,7} A. A. Ionin,⁷ S. I. Kudryashov,^{3,7,8} A. A. Rudenko,⁷ and N. A. Inogamov^{6,5}







Laser printing of resonant plasmonic nanovoids†

A. Kuchmizhak,^{*,a,b} O. Vitrik,^{a,b} Yu. Kulchin,^b D. Storozhenko,^b A. Mayor,^b
 A. Mirochnik,^c S. Makarov,^d V. Milichko,^d S. Kudryashov,^{d,e} V. Zhakhovsky^f and
 N. Inogamov^{f,g}