

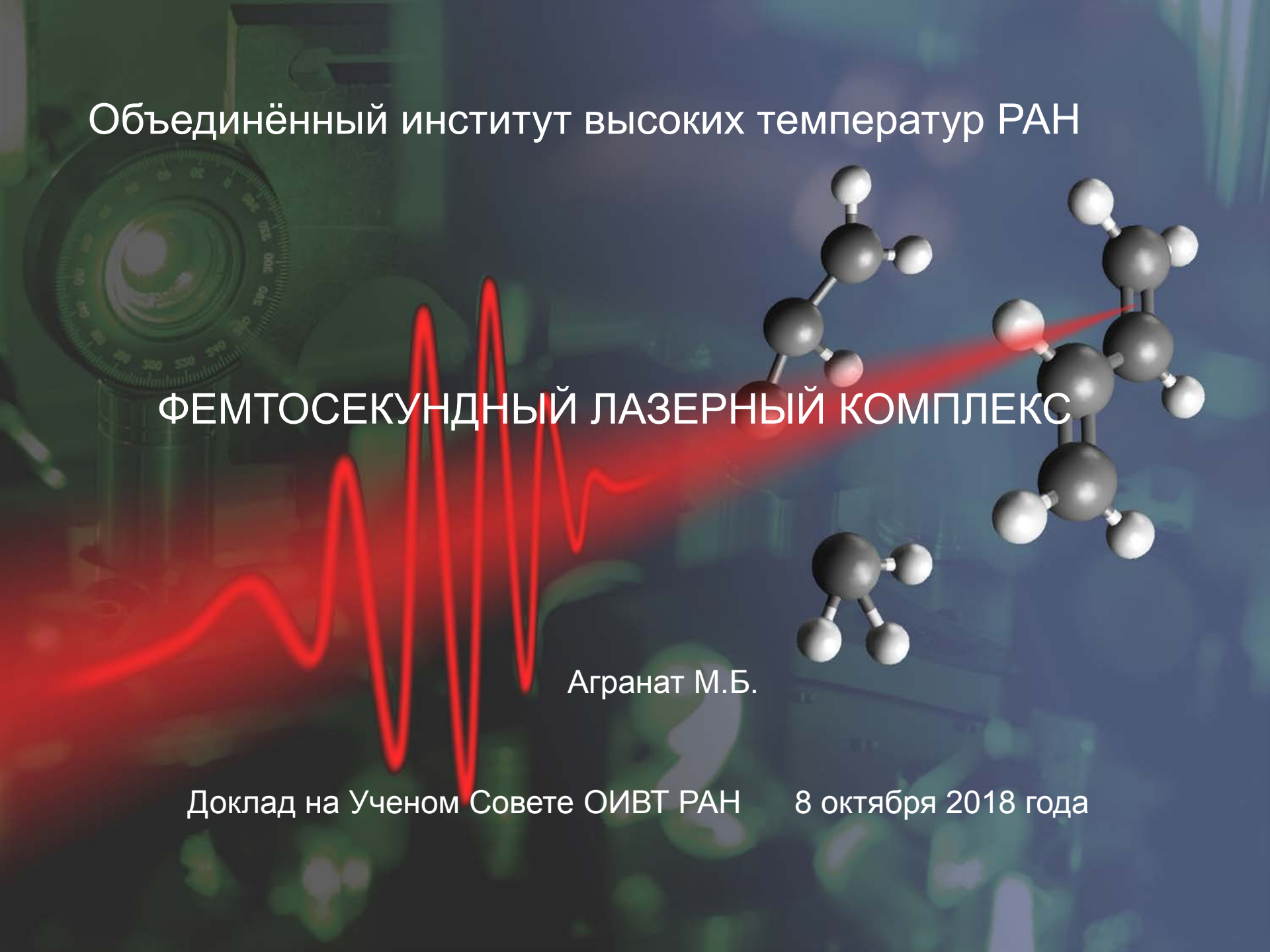
Объединённый институт высоких температур РАН

ФЕМТОСЕКУНДНЫЙ ЛАЗЕРНЫЙ КОМПЛЕКС

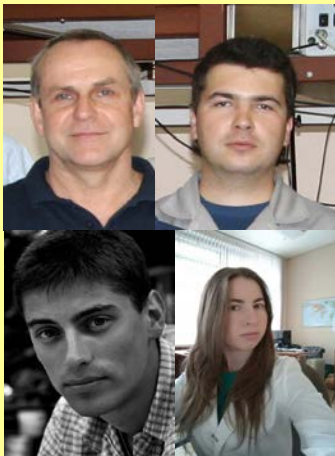
Агранат М.Б.

Доклад на Ученом Совете ОИВТ РАН

8 октября 2018 года



Экстремальные состояния вещества, возникающие при воздействии ультракоротких лазерных импульсов на конденсированные среды



*Кфмн Ашитков СИ., кфмн Комаров ПС,
ктн Ромашевский СА, нс Струлёва ЕВ*

- сжатие вещества до высоких давлений и диагностика короткоживущих состояний вещества, образование ударной волны, откольная прочность металлов при предельно высоких скоростях деформирования $\sim 10^9$ - 10^{10} с-1, теплофизические процессы на поверхности функциональных материалов



Кфмн Овчинников АВ., кфмн Чефонов О.В.

- свойства металлов, полупроводников и диэлектриков при воздействии мощного субпикосекундного ТГц импульса



Кфмн Ситников ДС., кфмн Ильина И.В..

- разработка новых технологий для клеточной микрохирургии с помощью фемтосекундного лазерного «пинцета-скальпеля»;
- исследование воздействия сверхкоротких импульсов дальнего инфракрасного (терагерцового) спектра излучения на биологические объекты



Зав. лабораторией, дфмн Агранат МБ

ФЕМТОСЕКУНДНЫЕ ЛАЗЕРНЫЕ СИСТЕМЫ

Тераваттная фемтосекундная хром-форстерит
лазерная система
1240 nm; 80 fs; 90 mJ; 10 Hz



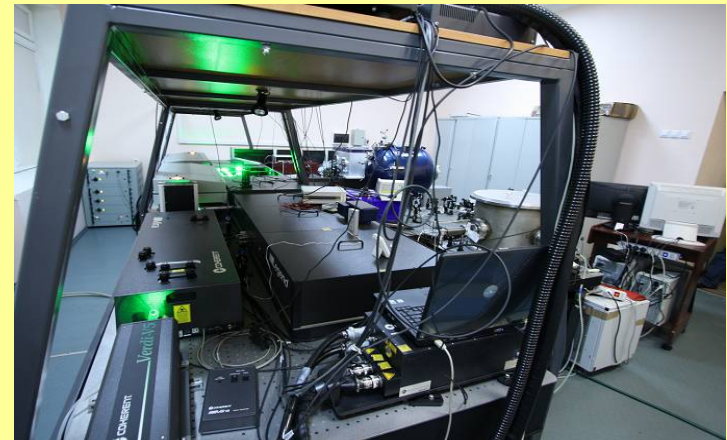
Субтераваттная фемтосекундная титан-сапфир
килогерцовая лазерная система
800 nm, 30 fs, 1 kHz, 2,5 mJ



Тераваттная фемтосекундная титан-сапфир
лазерная система
800 nm; 40 fs; 10 Hz, to 10 TW



Максимальная интенсивность
в пятне фокусировки диаметром 3мкм
 $P \approx 10^{19}$ Вт/см²



Интерферометрическая диагностика с использованием частотно-модулированного (чирпированного) импульса

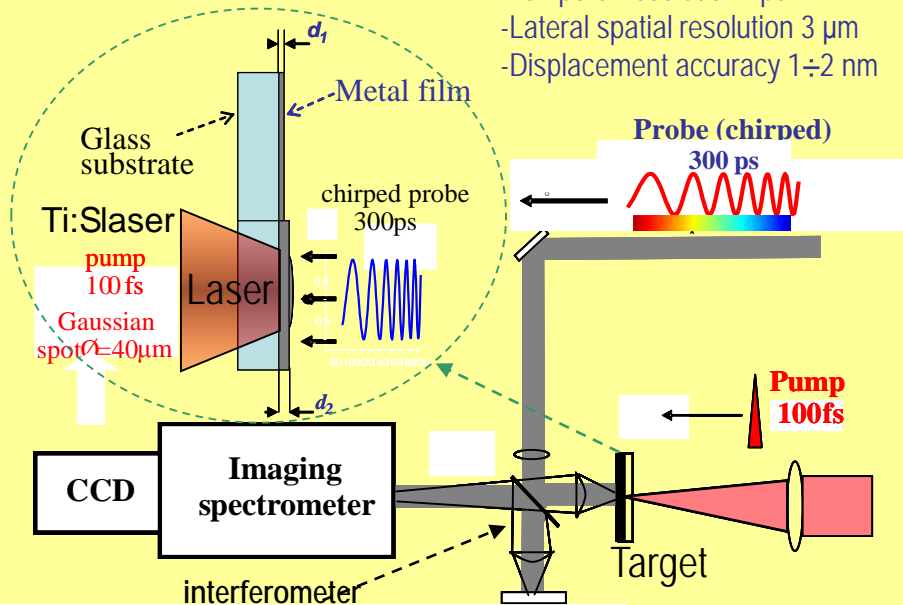


Временной диапазон измерений $0 \div 200$ пс
Временное разрешение 1 пс
Пространственное разрешение 2 мкм
Точность измерения смещения $2 \div 3$ нм

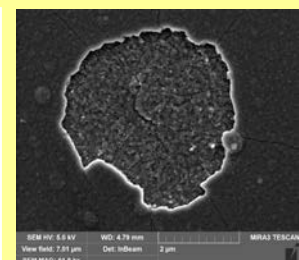
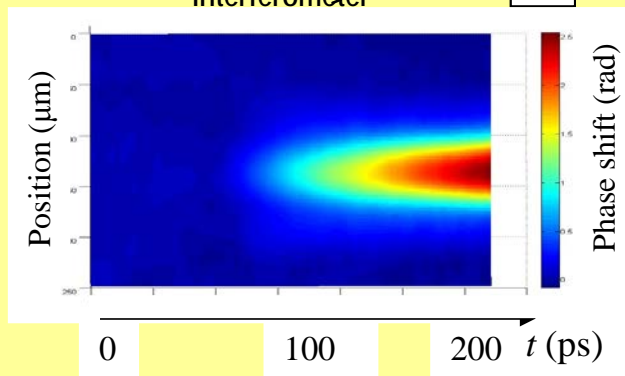
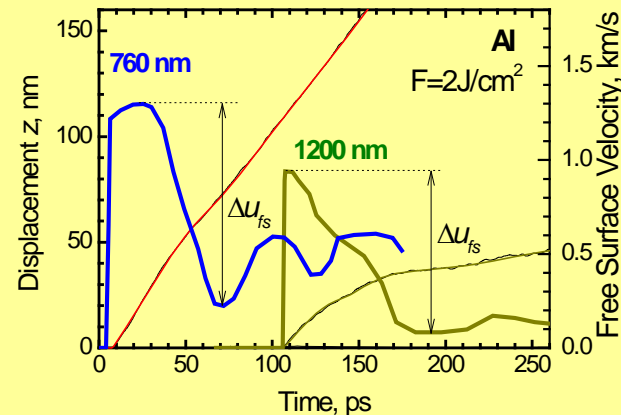
Откольная прочность металлов (Al, Fe, V, Ta) при предельно высоких скоростях деформирования $\sim 10^9 - 10^{10} \text{ с}^{-1}$.

Генерация ультракоротких УФ фемтосекундными лазерными импульсами. Интерферометрическая диагностика деформаций с пикосекундным и нанометрическим разрешением

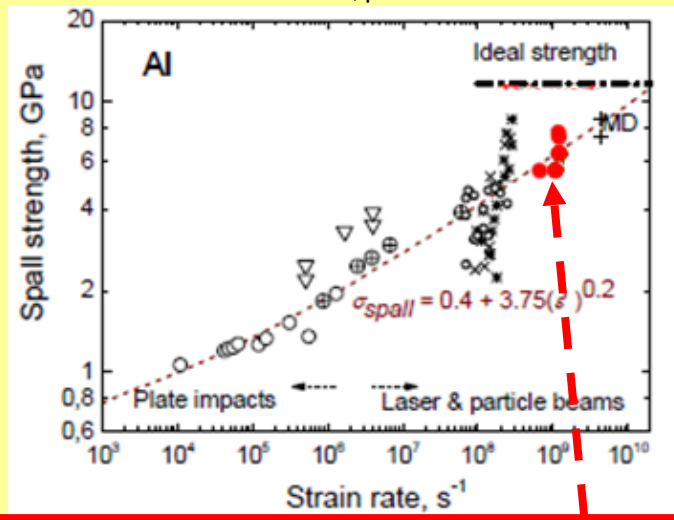
Ultrafast spectral interferometry



Волновые профили смещения и скорости свободной поверхности Al образцов толщиной 760 и 1200 нм



Откольное разрушение на тыльной поверхности мишени глубиной 200 нм



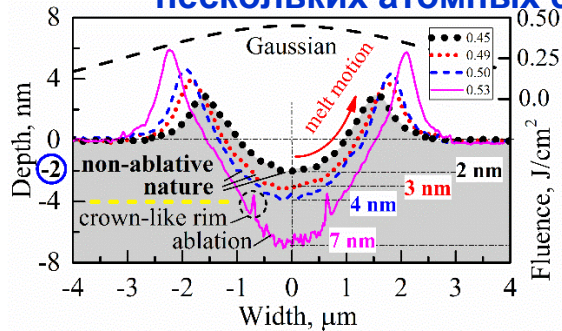
Измерена откольная прочность металлов (Al, Fe, Ta, V, Ti) при рекордно высоких скоростях деформирования $\sim 10^9 \text{ с}^{-1}$, величина которой составляет 50-70 % от предельно возможного значения их «идеальной» прочности

Выход УФ на тыльную поверхность мишени

Теплофизические процессы на поверхностях функциональных материалов при фемтосекундном лазерном воздействии

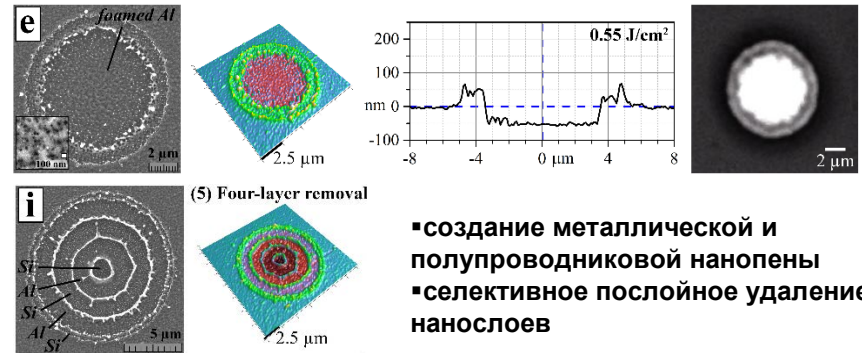
Сверхбыстрый нагрев, плавление и абляция сверхтонкого поверхностного слоя

Управление морфологией поверхности с точностью до нескольких атомных слоев



Создание:
*субнано-размерных структур и субнано-структурированных поверхностей ($R_a \sim 0.5$ нм)

Послойная модификация многослойной тонкопленочной структуры металл-полупроводник



▪ создание металлической и полупроводниковой нанопены
▪ селективное послойное удаление нанослоев

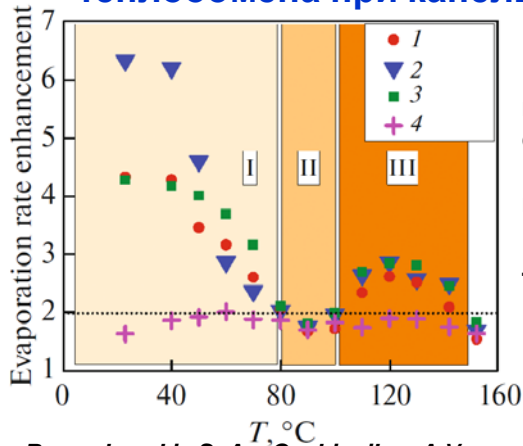
Romashevskiy S. A., Ashitkov S. I., and Agranat M. B.

Appl. Phys. Lett. 109, 261601 (2016) IF 3.411 Q1

S.A. Romashevskiy, P.A. Tsygankov, S.I. Ashitkov and M.B. Agranat

Appl. Phys. A, 124 (5),376 (2018) IF 1.4 Q2

Функциональные поверхности для интенсификации теплообмена при капельном охлаждении

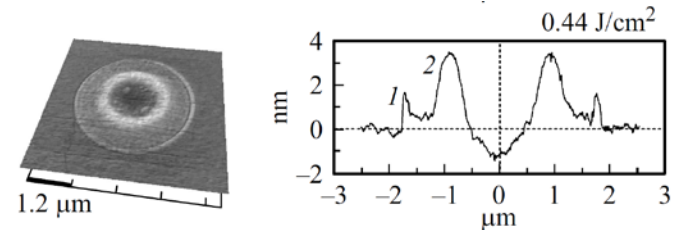


▪ создание супергидрофильных поверхностей с иерархической структурой
▪ увеличение скорости испарения жидкости до 6 раз
▪ управление температурой Лейденфроста

Romashevskiy S. A., Ovchinnikov A. V.

High Temperature, 56 (2), 255 (2018) IF 1.1 Q3

Особенности наноструктурирования при сверхбыстром нагреве в воде

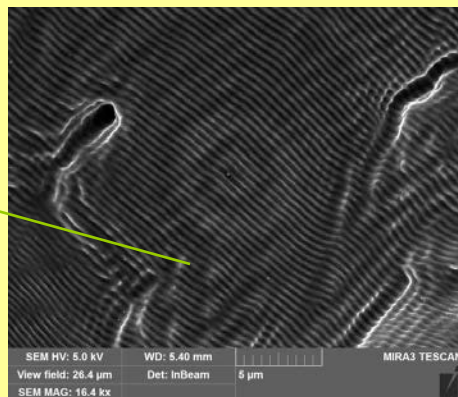
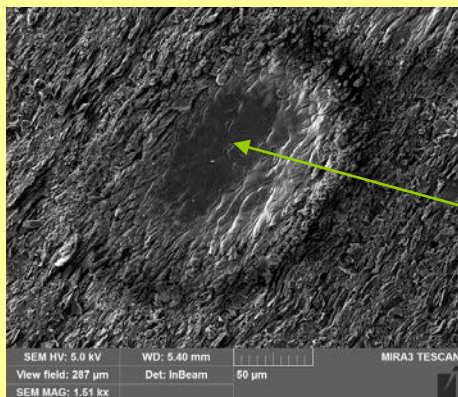


▪ формирование наномасштабных кольцевых и blisterных структур
▪ создание микрократеров глубиной 1 нм

S.A. Romashevskiy

Письма в ЖТФ, 44 (14), 58 (2018) IF 0.841 Q2

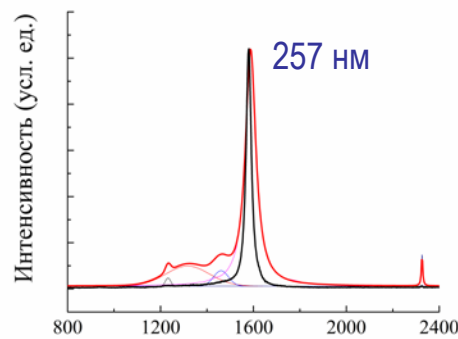
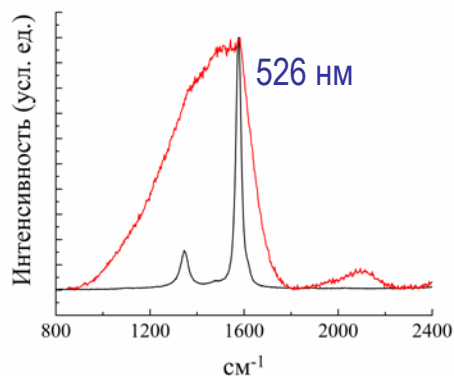
Модификация поверхностного слоя поликристаллического пирографита с помощью фемтосекундных лазерных импульсов



Ti:S лазер: 40 фс, 1.3 Дж/см²,
N (число импульсов)=600

1. Морфология - СЭМ (Tescan Mira3):

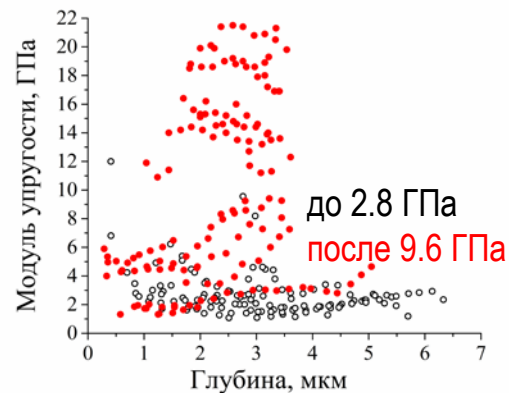
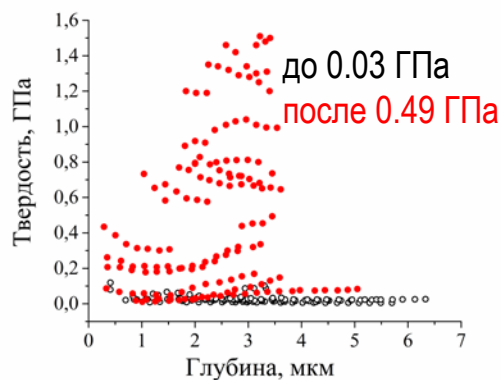
плавление поверхностного слоя с
образованием периодических наноструктур



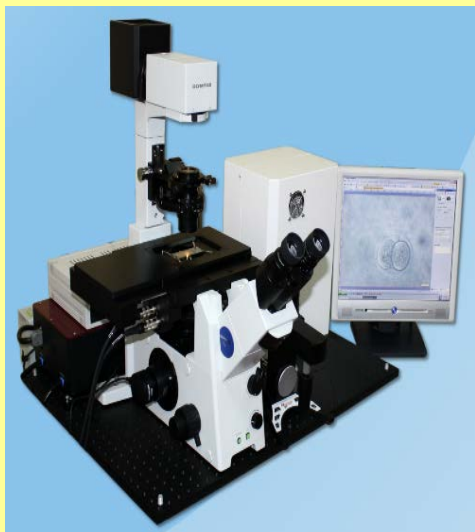
2. Спектроскопия комбинационного рассеяния света (inVia confocal Raman microscope):
-образование аморфной фазы углерода, карбина, наноалмазов и лонсдейлита

3. Измерение твердости и модуля упругости методом наноиндентирования ГОСТ 8.748-2011 (СЭМ НаноСкан 3Д):

-увеличение твердости в среднем в 16 раз;
-увеличение модуля упругости в среднем в 3.4 раза



Фемтосекундный лазерный скальпель – оптический пинцет



Создан действующий макет лазерного скальпеля
Премия правительства Москвы для мол.уч. в 2015 г.

Разработаны основы технологий:

Биопсии клеток эмбриона

**Лазерное ЭКО (разрезание оболочки скальпелем
и захват сперматозоида и перемещение под оболочку)**

Оптопорация (доставка веществ в клетку)

- Возможность полной автоматизации процедур
- Сохранение стерильности, бесконтактная хирургия
- Минимальный риск теплового повреждения эмбриона
- Субмикронная точность диссекции (минимальная ширина реза ~1 мкм)
- Траектория диссекции может быть абсолютно произвольной

Вспомогательный лазерный хэтчинг

Лазерная оптопорация клеток

Выделение области для
лазерной диссекции

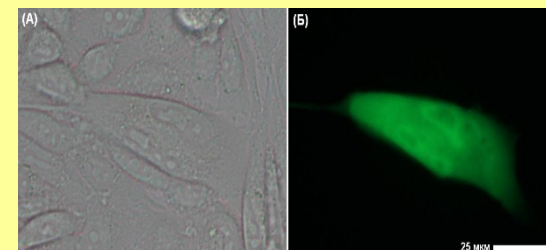
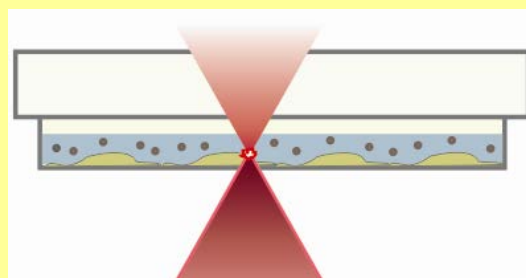
Отверстие в оболочке
эмбриона

Фокусировка лазерного
излучения на
мембранах клеток

Свечение белков в клетке
после оптопорации

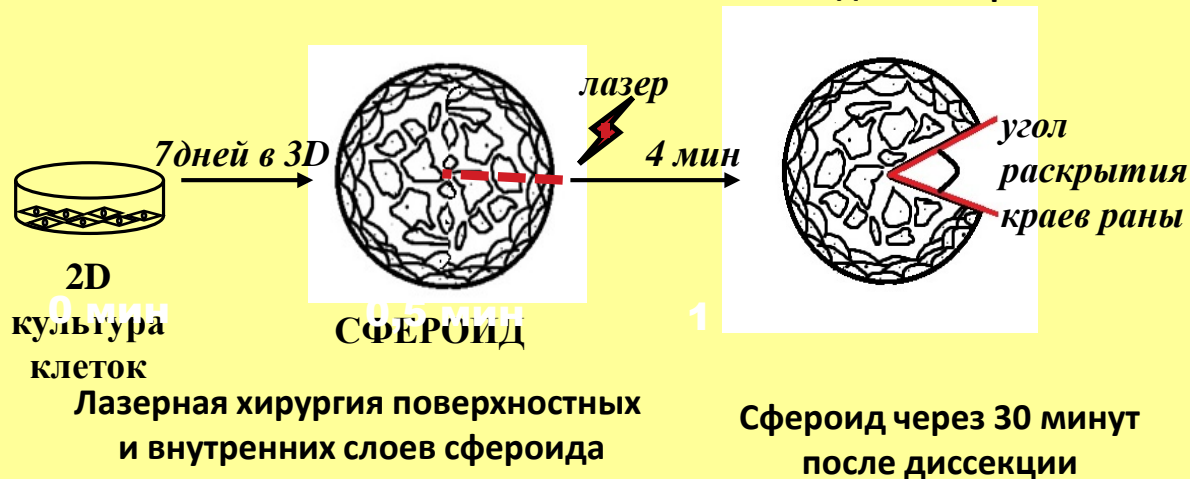
ДО

ПОСЛЕ



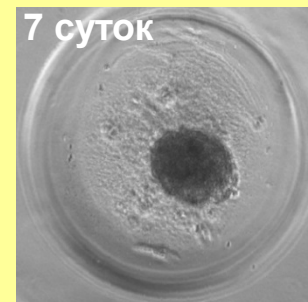
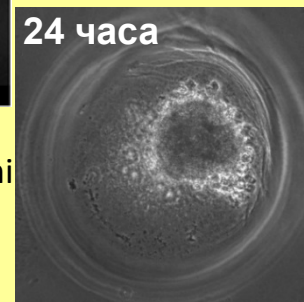
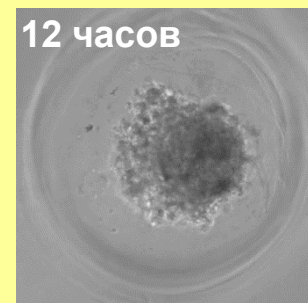
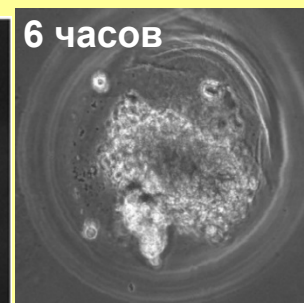
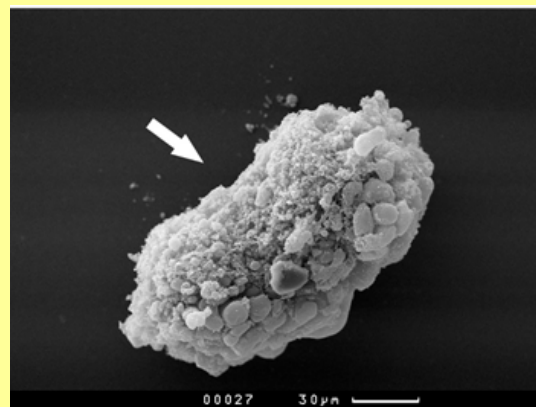
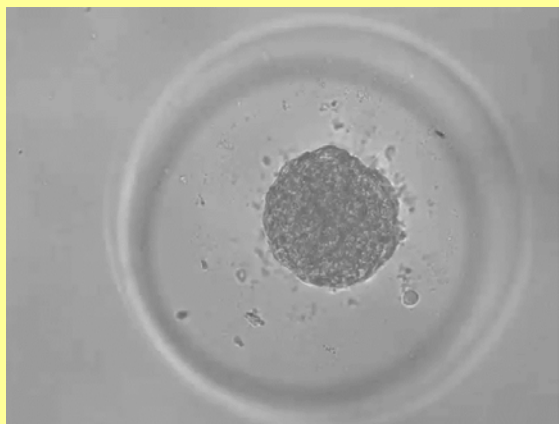
Лазерная микрохирургия для изучения процессов репарации *in vitro* с использованием клеточных сфероидов

Разработана модель повреждения клеточных сфероидов и изучены особенности их репарации. Модель может использоваться в косметологии для тестирования антивозрастных средств



- Клеточные сфероиды - трехмерные самоорганизующиеся сферические кластеры клеток (диаметр 150-200 мкм)
- Их структура приближена к структуре тканей *in vivo*

Заживление сфероида в течение 7 суток



Kosheleva, N. V., Ilina, I. V., Zurina, I. M., Roskova, A. E., Gorkun, A. A., Ovchinnikov, A. V., Agranat, M. B., Saburina, I. N, "Biology Open 0, 1-8 doi:10.1242/bio.017145 (2016). IF 5.784 Q1

**Воздействие мощных ультракоротких импульсов
дальнего инфракрасного (терагерцового) спектра
излучения на конденсированные среды**

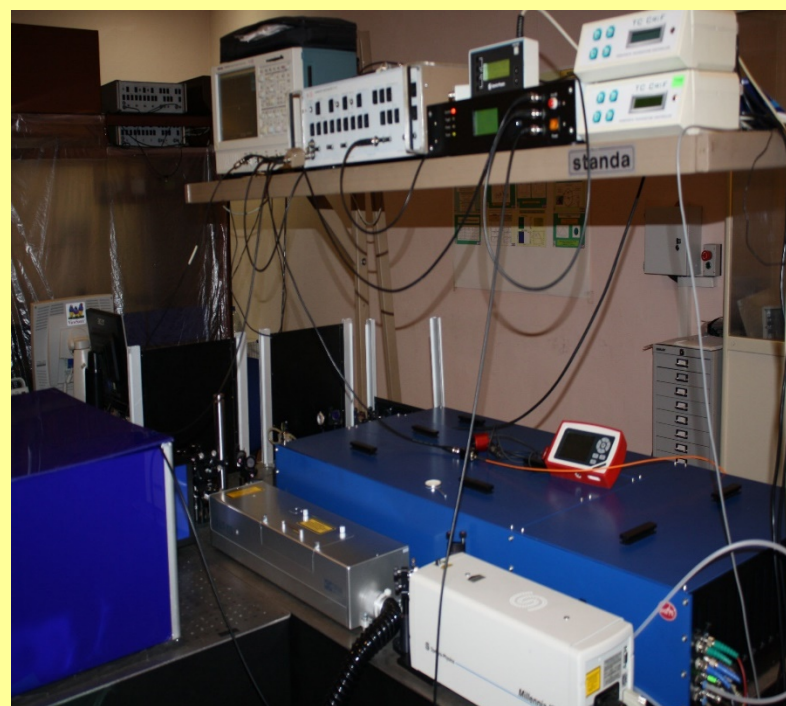
Уникальная научная установка «Лазерный тераваттный фемтосекундный комплекс»

ТФЛК-1



Параметры лазерной системы
Длина волны 1240 нм
Энергия в импульсе до 80 мДж
Длительность импульса 100 фс
Частота повторения 10 Hz
 $M2 = 1.3$

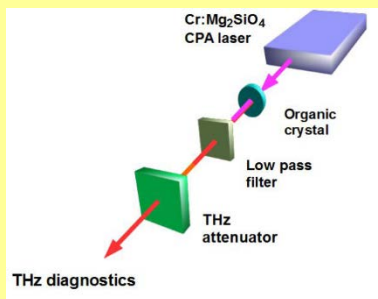
ТФЛК-2



Параметры лазерной системы
Длина волны 1240 нм
Энергия в импульсе до 1.5 мДж
Длительность импульса 100 фс
Частота повторения 100 Hz
 $M2 = 1.2$

Рекордный по мощности короткоимпульсный источник терагерцового излучения

- Диапазон частот 0.1 ÷ 5 ТГц
- Длительность импульса (один период) 200 фс (5 ТГц) – 10 пс(0.1ТГц)
- Пиковая мощность излучения до 5 GW
- Напряженность электрического поля 42 МВ/см



Ключ к получению рекордных параметров - тераваттная фемтосекундная хром-форстерит лазерная система ОИВТ РАН, изготовленная из российских комплектующих изделий и не имеющая аналогов в мире.

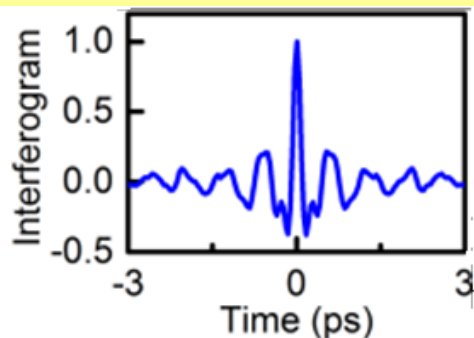


$$P^{NL}(t, \mathbf{r}) = \hat{\chi}^{(2)} E(t, \mathbf{r}) E(t, \mathbf{r}).$$

$$E(t, \mathbf{r}) = E_0(t, \mathbf{r}) \cos \omega t.$$

$$P^{NL}(t, \mathbf{r}) = \chi_{\text{eff}}^{(2)} E_0^2(t, \mathbf{r}) \cos^2 \omega t = \frac{1}{2} \chi_{\text{eff}}^{(2)} E_0^2(t, \mathbf{r}) + \frac{1}{2} \chi_{\text{eff}}^{(2)} E_0^2(t, \mathbf{r}) \cos 2\omega t. \quad (2.19)$$

Длительность импульса



Применение:

- дистанционное воздействие на вещество
- дистанционная идентификация различных материалов, в том числе биообъектов

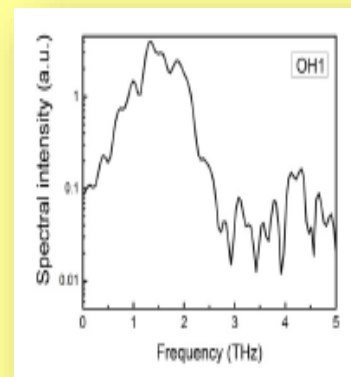
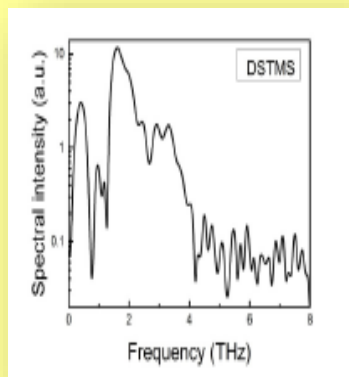
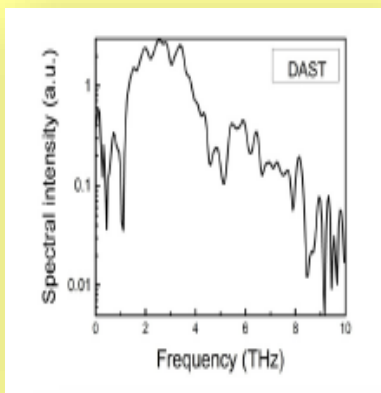
Работа сделана совместно с сотрудниками Paul Scherrer Institute, Швейцария

C. Vicario, A.V. Ovchinnikov, S.I. Ashitkov, M.B. Agranat, V.E. Fortov, and C. P. Hauri *Optics Letters*, Vol. 39, Issue 23, pp. 6632–6635 (2014), IF=3,2, Q1

Record-breaking source of coherent THz radiation of sub-picosecond pulse duration

Joint work with Paul Scherrer Institute, Switzerland

Terahertz generation in organic crystals **DAST**, **DSTMS**, **OH1** pumped by a Cr:forsterite laser at central wavelength of 1.25 μm



Organic crystal	Thickness-Diameter (mm)	Maximum efficiency	Max. energy/fluence $\mu\text{J}/\text{cm}^2$	Emitted spectrum	Focus FWHM μm	Electric field
DAST	0.18-5	2.1%	62 μJ / 280 $\mu\text{J}/\text{cm}^2$	0.1-10 THz	490 μm	6.2 MV/cm
DSTMS	0.9-10	1.1%	150 μJ / 110 $\mu\text{J}/\text{cm}^2$	0.1-4 THz	210 μm	18 MV/cm
OH1	0.44-10	3.2%	270 μJ / 300 $\mu\text{J}/\text{cm}^2$	0.1-3 THz	440 μm	9.9MV/cm

Published in *Optics Express* (2015) Vol. 23. Issue 4, pp. 4573-4580, IF=3.749 **Q1**

Генерация узкополосного ТГц излучения

Количество периодов от 1 до 50
Перестройка частоты в диапазоне от 0.5 до 7 ТГц

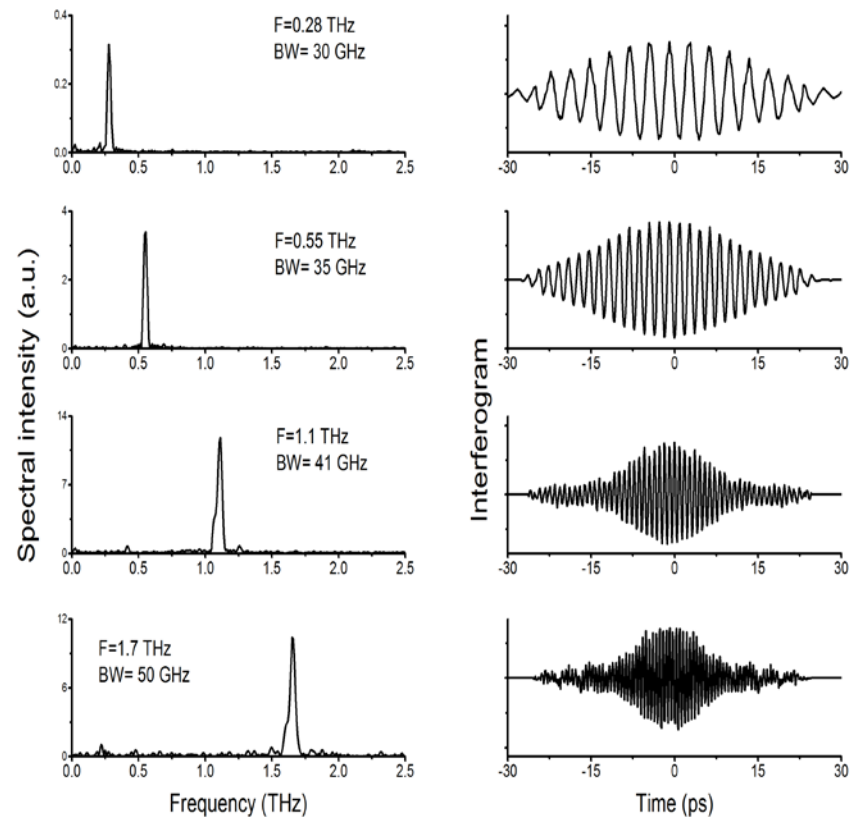
$$f = 0.28 \text{ ТГц}$$
$$\Delta f = 30 \text{ ГГц}$$
$$E = 5 \text{ мкДж}$$

Уникальная тераваттная хром-форстеритовая лазерная система ОИВТ РАН

Нелинейный органический кристалл

ТГц импульсы

Создан терагерцовый источник, обеспечивающий генерацию с узкой спектральной линией, перестраиваемый в широком диапазоне частот с напряженностью электрического поля до нескольких МВ/см. Схема генерации основана на оптическом выпрямлении лазерных импульсов с периодической модуляцией временного профиля интенсивности.



Грант Минобрнауки Россия-Швейцария № 14.613.21.0056 2016-2017

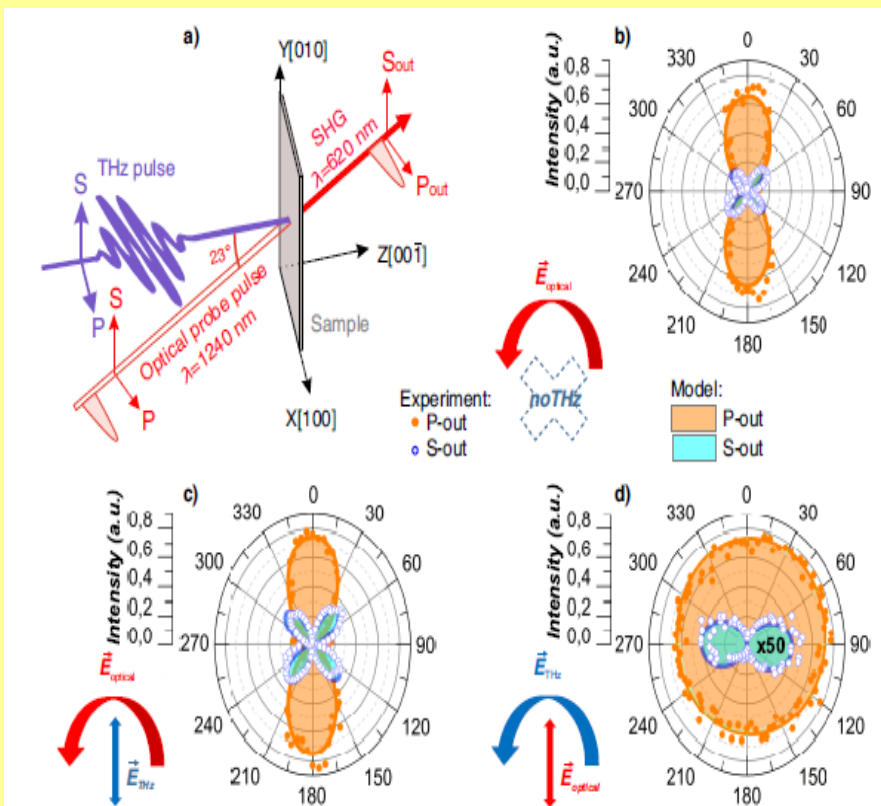
Совместно с Paul Sherrer Institute (PSI) Swiss (Christoph Hauri, Carlo Vicario)

. Carlo Vicario, Andrey V. Ovchinnikov, Oleg V. Chefonov, M. Jazbinsek and Christoph P. Hauri,

“Generation of strong-field spectrally-tunable Terahertz pulses”,

Nature Communications (2017 accepted) **Q1**

Изменения параметра порядка сегнетоэлектрика BaSrTiO_3 при резонансном возбуждении фононных колебаний ТГц импульсом



*Работа выполняется в рамках гранта
РНФ №16-12-10520*

*Основной исполнитель: МИРЭА
Руководитель лаборатории Мишина Е.Д.
ОИВТ РАН является соисполнителем по
гранту.*

Генерация второй гармоники индуцированная электрическим полем сильного однопериодного терагерцового импульса с амплитудой электрического поля 300 кВ / см изучается в классической сегнетоэлектрической тонкой пленке BaSrTiO_3 .

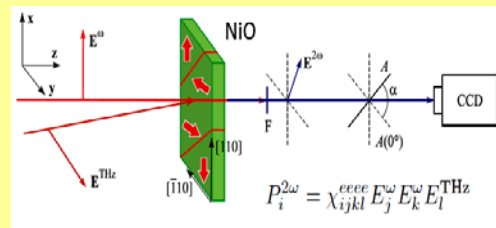
Полученные результаты показали изменения параметра порядка сегнетоэлектрика при резонансном возбуждении фононных колебаний ТГц импульсом.

. Kirill A. Grishunin, Nikita A. Ilyin, Natalia E. Sherstyuk, Elena D. Mishina, Alexey Kimel, Vladimir M. Mukhortov, Andrey V. Ovchinnikov, Oleg V. Chefonov & Mikhail B. Agranat, "THz Electric Field-Induced Second Harmonic Generation in Inorganic Ferroelectric", Scientific Reports, 7, 687 Q1

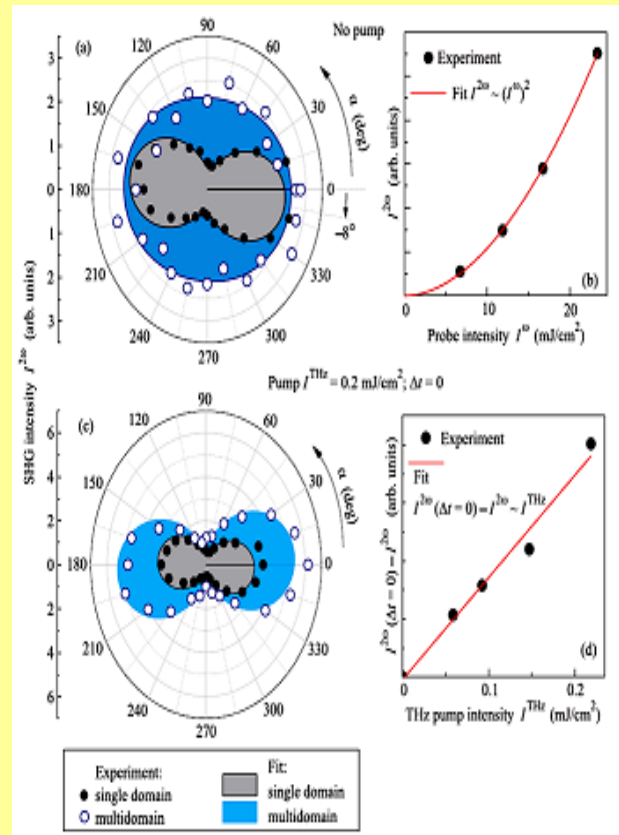
Управление излучением ТГц импульсов состоянием ферроиков с предельно высокой скоростью

Работа выполняется в рамках гранта РФФ №16-12-10520

Основной исполнитель: МИРЭА
Участники работы: ОИВТ РАН, Radboud University Nijmegen, Нидерланды, ФТИ им. Иоффе



Усиление генерации второй оптической гармоники с энергией фотона 2эВ в модельном centrosymmetric антиферромагнетике NiO при одновременном воздействии пикосекундных импульсов терагерцового излучения. Экспериментально доказан электродипольный механизм взаимодействия электрического поля ТГц импульса с электронной подсистемой NiO

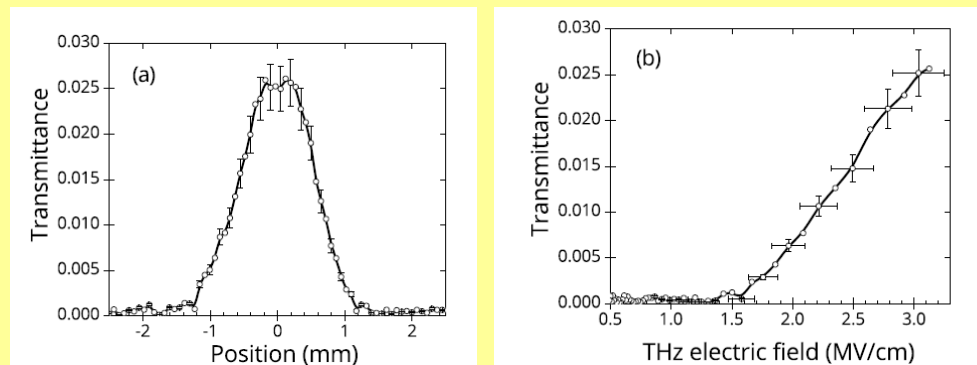


А.В. Овчинников, О.В. Чефонов, М.Б. Агранат, К.А. Гришунин, Н.А. Ильин, Р.В. Писарев, А.В. Кимель, А.М. Калашникова, *Письма в ЖЭТФ*, 104, 7 (2016)

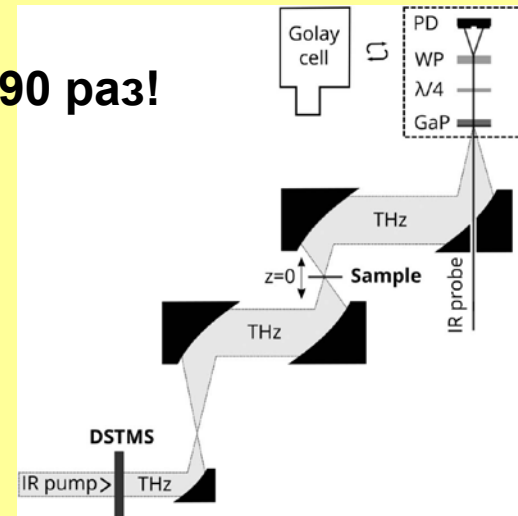
СВЕРХБЫСТРОЕ УПРАВЛЕНИЕ СВЕТОПОГЛОЩЕНИЕМ И ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬЮ
ПЕРСПЕКТИВНЫХ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ
С ПОМОЩЬЮ СВЕРХСИЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ ТЕРАГЕРЦОВОГО ИМПУЛЬСА

Интенсивные терагерцовые эффекты в кремнии

При увеличении поля от 1.5 до 3.1 MV/cm коэффициент пропускания увеличивается в 90 раз!



THz field-induced transmittance of n-doped silicon measured using Z-scan technique (a) and its deduced dependence on the THz electric field strength (b).



Open-aperture Z-scan technique. PD, balanced InGaAs photodetector; WP, Wollaston prism.

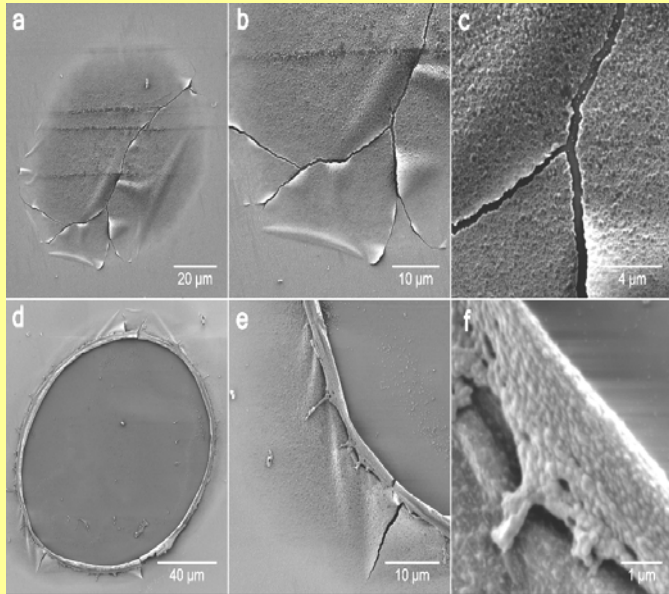
Совместно INRS-EMT, Varennes, Québec, Canada

O. V. Chefonov, A. V. Ovchinnikov, S. A. Romashevskiy, X. Chai, T. Ozaki, A. B. Savel'ev, M. B. Agranat, and V. E. Fortov **Optics Letters** 42, 4889-4892 (2017) IF=3.416 Q1

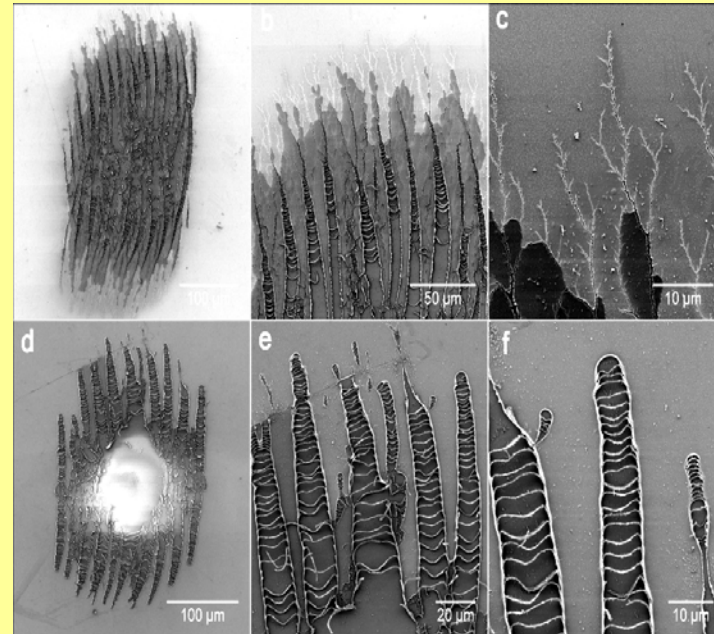
O. V. Chefonov, A. V. Ovchinnikov, M. B. Agranat, V. E. Fortov, E. S. Efimenko, A. N. Stepanov, A. B. Savel'ev Nonlinear Transmittance of Intense Few Cycle Terahertz Pulse Through Opaque n-doped Si// 2018 В редакции, **Phys.Rev.B**, Q1

Разрушение металлических плёнок субпикосекундным ТГц импульсом

Плёнки алюминия толщиной 20 нм



СЭМ изображения отверстий и фрагментов отверстий после однократного воздействия ТГц импульса. Порог - $0,15 \text{ Дж/см}^2$
Максимальная напряжённость поля в центре пятна составляет величину 17 МВ/см .

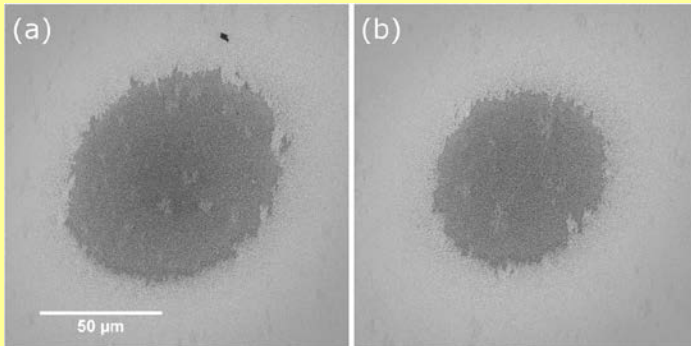


СЭМ зображення фрагментов характерных разрушений при многократном воздействии (до 600 импульсов)

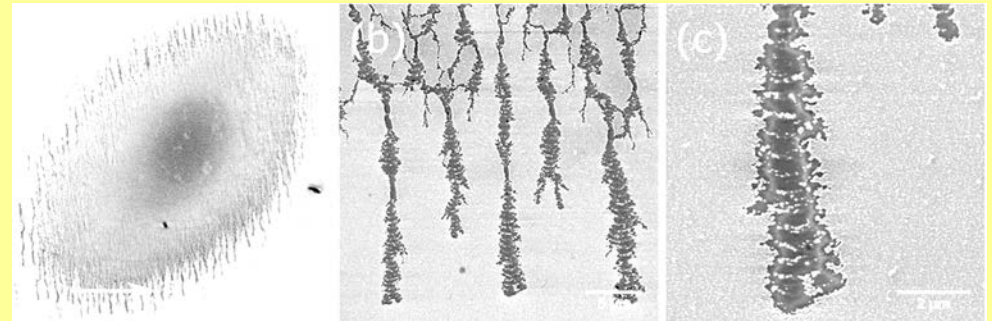
**M.B. Agranat, O.V. Chefonov, A.V. Ovchinnikov,
P.S. Kondratenko, S.I. Ashitkov, V.E. Fortov
Phys.Rev.Lett. 120, 085704 (2018) IF=8,5, Q1**

Разрушение металлических плёнок субпикосекундным ТГц импульсом

Плёнки никеля толщиной 20 нм



SEM images of nickel film damages induced by single terahertz pulse at different fluences. a: $F = 0.43 \text{ J/cm}^2$, b: $F = 0.39 \text{ J/cm}^2$



SEM image of nickel film damage induced by multiple terahertz pulses ($N = 40$) at fluence $F = 0.43 \text{ J/cm}^2$. b, c Image segments with different magnifications. The arrow indicates the direction of the terahertz electric field

O. V. Chefonov · A. V. Ovchinnikov · S. A. Evlashin · M. B. Agranat

Damage Threshold of Ni Thin Film by Terahertz Pulses

[Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves](#) November 2018, Volume 39, [Issue 11](#), pp

1047–1054 **Q1** <https://doi.org/10.1007/s10762-018-0537-8>

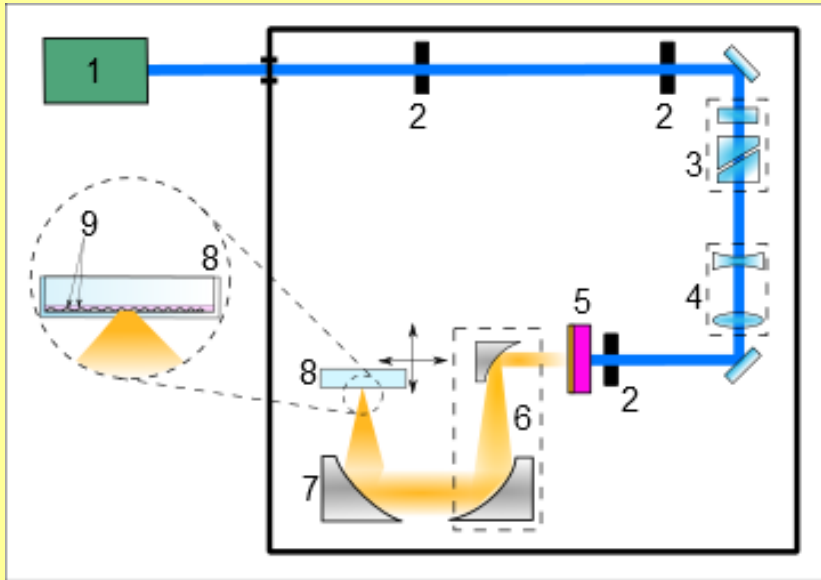
Изучение биоэффектов под действием мощного импульсного ТГц излучения

- Многочисленные исследования на биообъектах не дают однозначного ответа на вопрос безопасно ли ТГц излучение?
- Можно ли его использовать для репрограммирования клеток и в терапии заболеваний?

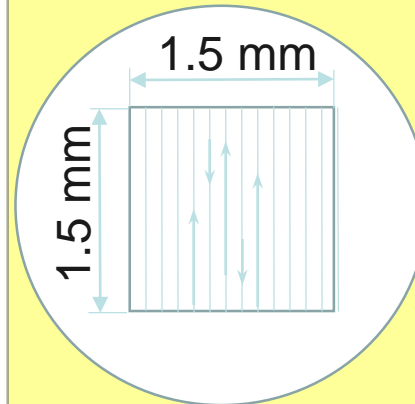
Исследования в этом направлении проводятся совместно с:

- НИИ Общей патологии и патофизиологии
- ФНКЦ ФМБА РФ
- Факультетом фундаментальной медицины МГУ имени М.В. Ломоносова

Экспериментальная схема



1 – фемтосекундный лазер, 2 – ирисовая диафрагма, 3 – блок ослабления, 4 – телескоп, 5 – кристалл DSTMS с фильтром, 6 – зеркальный телескоп, 7 – фокусирующее параболическое зеркало, 8 – чашка Петри, 9 – клеточный монослой



время облучения 15 мин
частота следования 100 Hz
энергия ТГц импульса 10 мкДж,
напряженность поля 1 МВ/см,
частотный диапазон 0.2 – 3 ТГц
объект – монослой стволовых клеток