

**Объединённый Институт Высоких Температур
Российская Академия Наук**

ФЕМТОСЕКУНДНЫЙ ЛАЗЕРНЫЙ КОМПЛЕКС

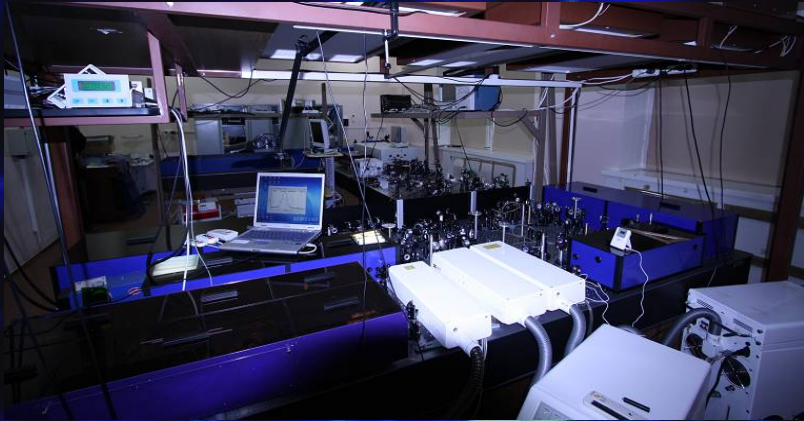
**Физика экстремальных состояний
Биомедицинские технологии
Прецизионная обработка материалов**

Агранат М.Б.

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 3 мкм
 $P \approx 10^{19}$ Вт/см²



ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ЛАЗЕРНЫХ СИСТЕМ КОМПЛЕКСА

Длины волн излучения – 400, 800, 620, 1240 нм

Длительности импульсов – 30 ÷ 250 фс

Частота повторений - до 10 кГц

Мощность излучения в импульсе – до 10 ТВт

Максимальная интенсивность (реальная, при диаметре пятна фокусировки ≈ 3 мкм) 10^{19} Вт/см²

Фемтосекундные “хром – форстерит” и итербиевая лазерные системы - это первые отечественные установки, изготовленные целиком на базе российских комплектующих изделий и не имеющие аналогов в России и за рубежом

*Агранат М.Б., Ашитков С.И., Овчинников А.В., ИТЭС ОИВТ РАН
Патент на полезную модель № 47140, приоритет от 10 марта 2005 г.*

ДИАГНОСТИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

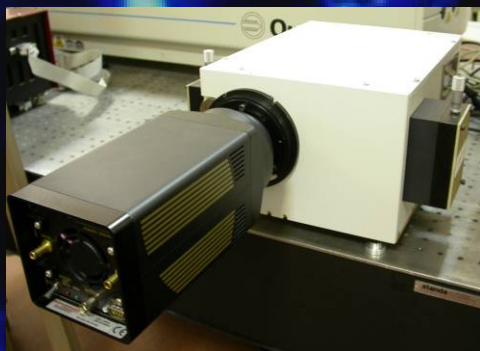
Кросс-корреляторы третьего порядка
инфракрасного и видимого диапазонов



Система анализа амплитудных и
фазовых характеристик
фемтосекундного лазерного импульса



Высококчувствительный
спектральный комплекс



Рентгеновский диагностический комплекс



Спектрометр Acton Spectra Pro 2300i:

- Турель с 2-мя решетками ($600/1200 \text{ mm}^{-1}$)
- Спектральный диапазон 0-1400 нм
- Спектральное разрешение до 0.14 нм
- Оптическая схема Черни-Тёрнера
- Оснащен ПЗС камерой с МКП

1. Спектрометр Гамовы с ПЗС
2. Фокусирующая система
3. Мишенный узел
4. Рентгеновский ФД
5. Рентгеновская ПЗС-камера

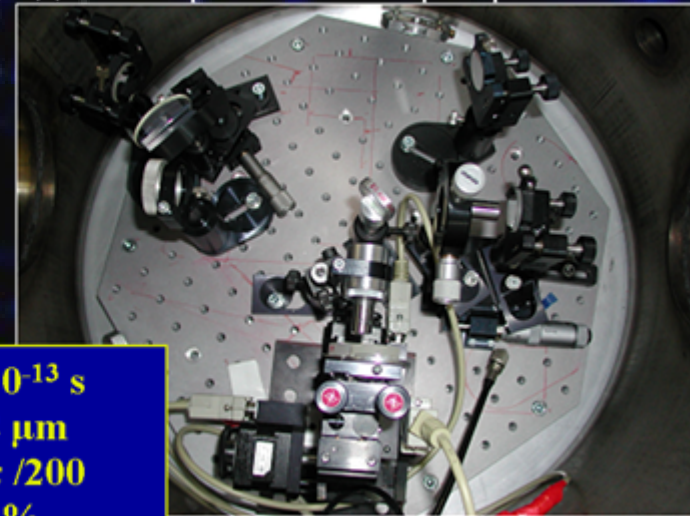
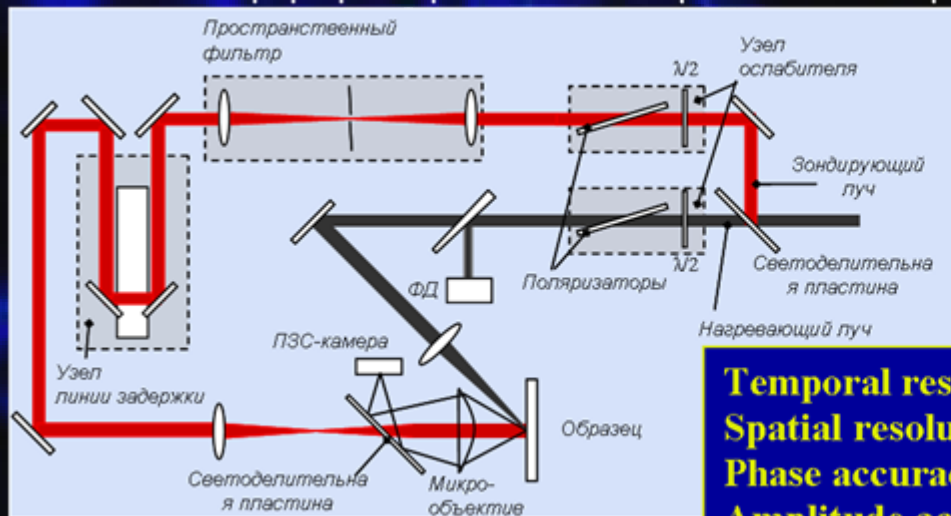
Рентгеновская камера Princeton

Матрица 1340 x 1300 пикселей

- Рабочий диапазон (<30 eV to ~ 10 keV)
- Режим счета фотонов
- Разрядность 16 бит

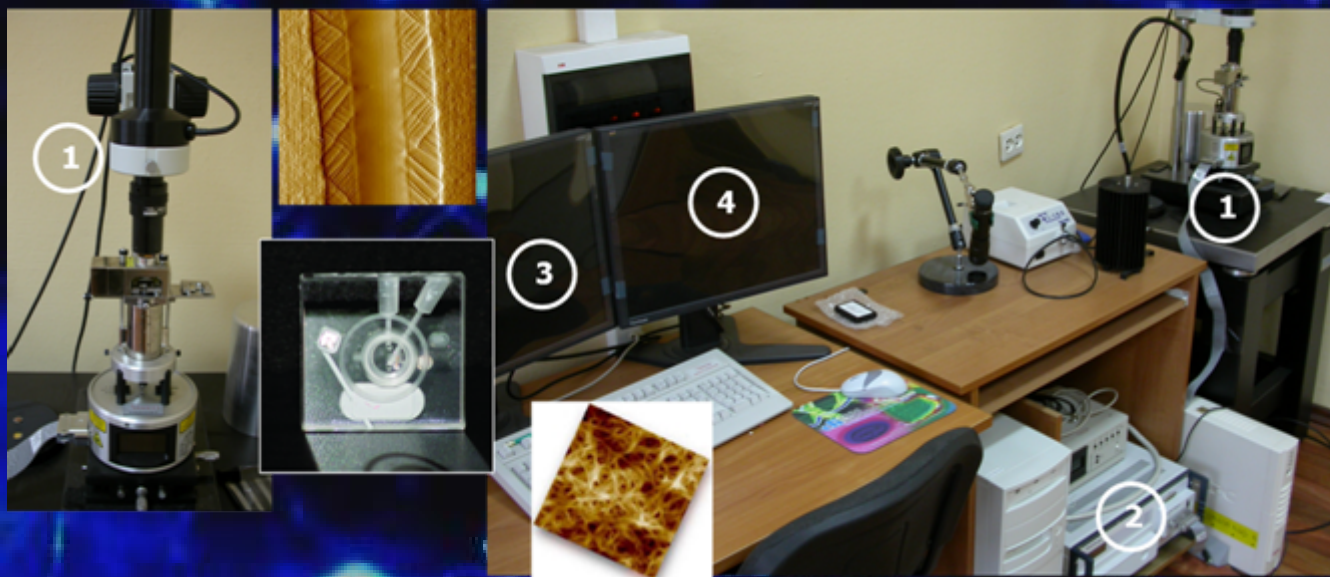
ФЕМТОСЕКУНДНЫЙ МИКРОИНТЕРФЕРОМЕТР

Схема интерференционной микроскопии с фемтосекундным временным разрешением



Temporal resolution $\sim 10^{-13}$ s
Spatial resolution $\sim 2 \mu\text{m}$
Phase accuracy $\sim \pi / 200$
Amplitude accuracy $\sim 2\%$

MultiMode scanning probe microscope (MM-SPM)



Veeco di Multimode V

1. MultiMode SPM
2. NanoScope Controller 5
3. Control monitor
4. Display monitor

Scan size $125 \times 125 \mu\text{m}$
 Vertical range $5.0 \mu\text{m}$
 Sample size $< \varnothing 15 \text{ mm}$, $< 5 \text{ mm}$ thick
 Noise $< 0.3 \text{ \AA}$ RMS in vertical (Z) dimension
 Color CCD
 Fluid Imaging Cell and O-ring

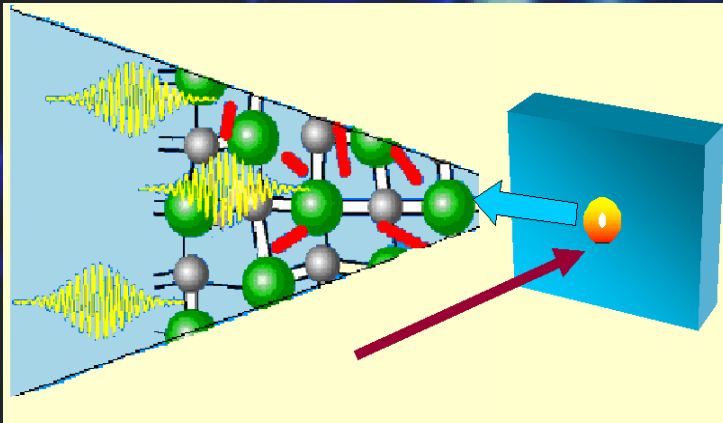
Scanning techniques

- Contact AFM
- Tapping Mode AFM
- Phase Imaging
- Non-contact AFM
- Scanning Tunneling Microscopy (STM)
- Electrochemical Microscopy

НЕРАВНОВЕСНЫЙ НАГРЕВ ЭЛЕКТРОННОЙ, СПИНОВОЙ И ФОНОННОЙ ПОДСИСТЕМ В КРИСТАЛЛАХ

Тепловое излучение «горячих» электронов

Впервые открыто и изучено в России



«Горячие» электроны – температура 10^4 K

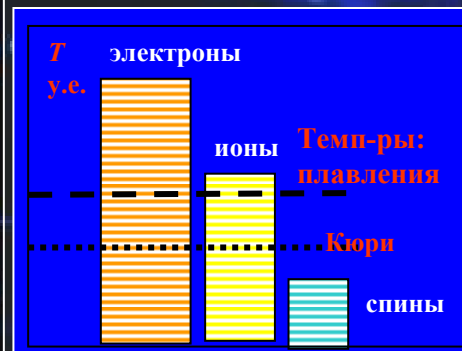
«Холодные» ионы - температура 10^3 K (ниже температуры плавления)

- высокотемпературный (10^4 K) источник теплового излучения для оптической пирометрии
- неразрушающий контроль металлических включений в прозрачных диэлектриках

Неравновесный нагрев электронной, спиновой и фоновой подсистем в ферромагнетиках

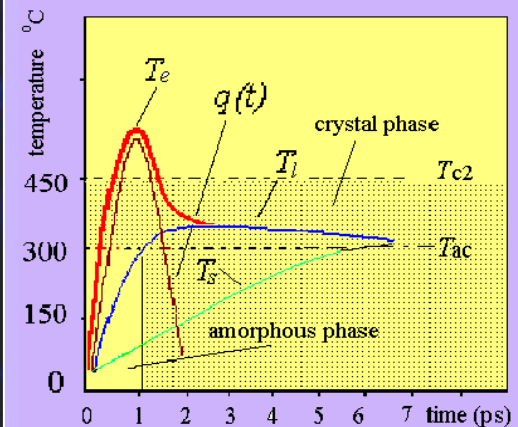
В пикосекундном временном интервале:

«Горячие» ионы – «холодные» спины
Высокотемпературный жидкий ферромагнетик?



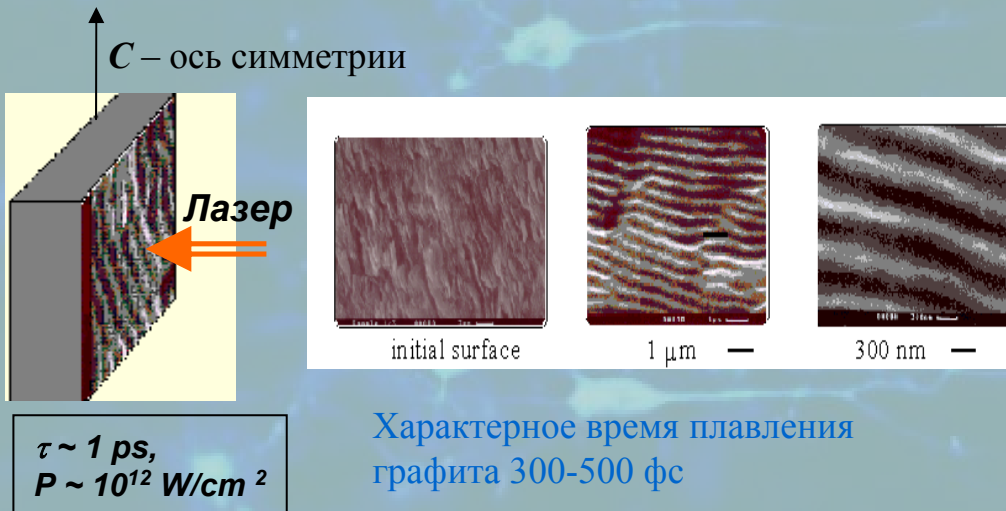
- сверхбыстрая магнитная электроника
- новые материалы для магнитной записи информации
- быстродействующие датчики и переключатели

Магнитная динамика в ферромагнитных плёнках Ni и TbFeCo



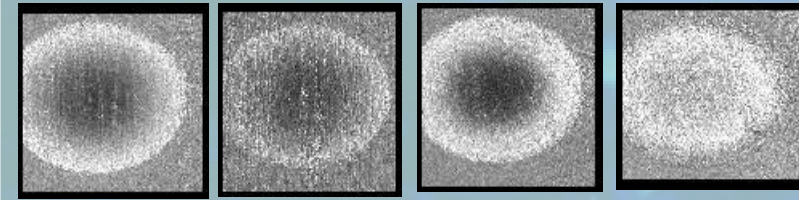
СВЕРХБЫСТРЫЕ ФАЗОВЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ И АБЛЯЦИЯ В МЕТАЛЛАХ И ГРАФИТЕ

Формирование периодической структуры и образование аморфного углерода при сверхбыстром плавлении микрокристаллического графита



Сверхбыстрые фазовые превращения в графите

Dynamics R_{cr} – reflected component



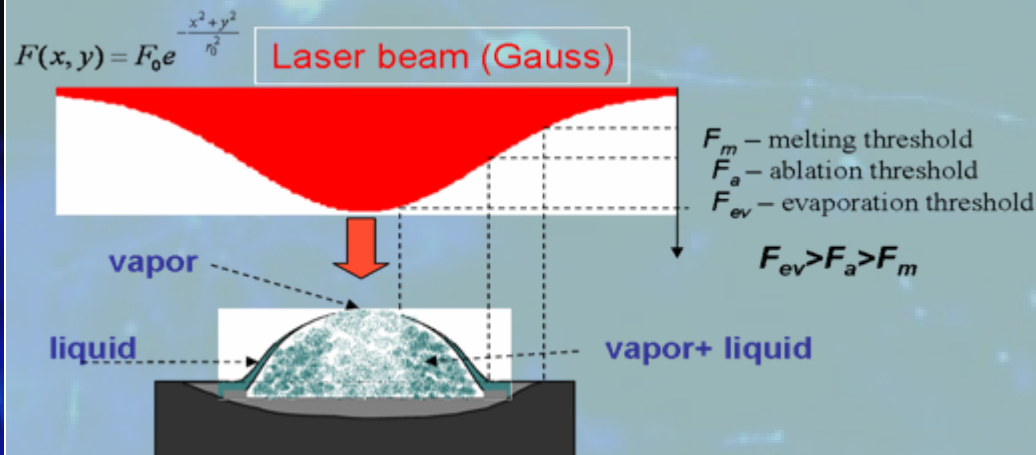
0,4 ps 1,4 ps 10 ps final

non-thermal nature of the structural transition
“Hot” electrons - “Cold” ions

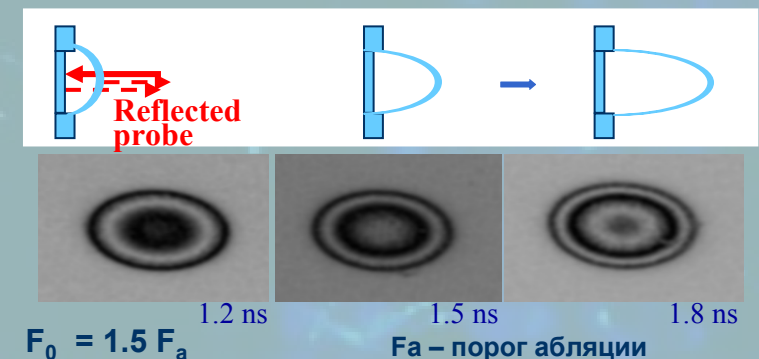
Laser pulse absorption Hot electrons ($T_e \gg T_i$)	Ultrafast melting	Electron – phonon relaxation ($T_e \rightarrow T_i$)
100 fs	$\approx 300 \div 500 \text{ fs}$	$\approx 2 \text{ ps}$

t

Структура лазерного факела



Движение откольного слоя, Ni



ОБРАЗОВАНИЕ И РЕЛАКСАЦИЯ ЭЛЕКТРОН-ДЫРОЧНОЙ ПЛАЗМЫ, СВЕРХБЫСТРЫЕ ФАЗОВЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ И АБЛЯЦИЯ В ШИРОКОЗОННЫХ ПОЛУПРОВОДНИКАХ (Si и GaAs)

Dynamics of ultrafast processes:

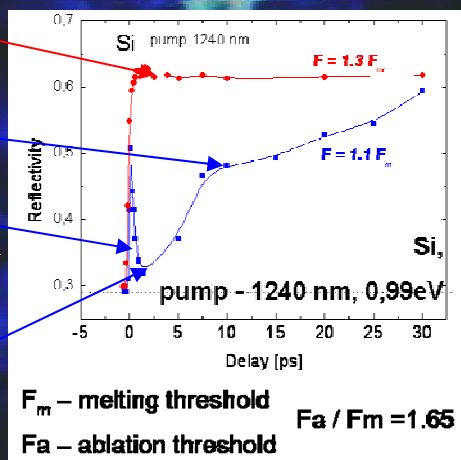
creation of electron-hole plasma, Auger recombination, electron-phonon relaxation, ultrafast melting, ablation

Ultrafast melting

Lattice heating and melting

Electron-hole plasma generation

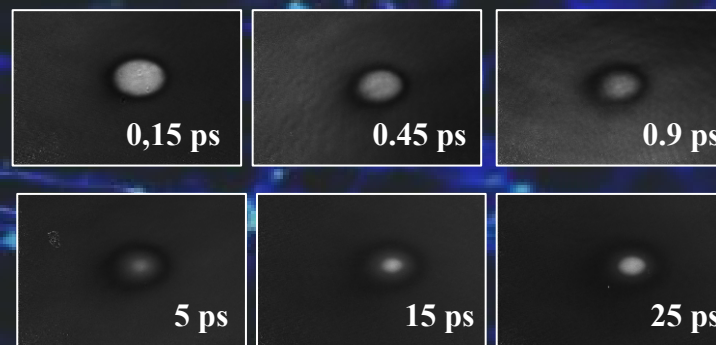
Carrier recombination



Pump-probe technique, $\lambda = 1240 \text{ nm}$, $\lambda (2\omega) = 620 \text{ nm}$, $\tau \approx 80 \text{ fs}$

Probe – 1240 nm

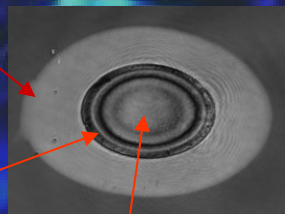
Probe pulse energy < Energy gap



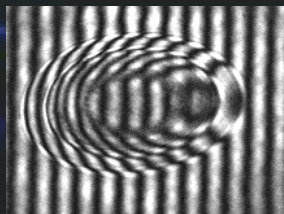
Динамика разлёта поверхностного слоя GaAs

Плавнение поверхностного слоя. Поток энергии нагревающего импульса $F = F_m$

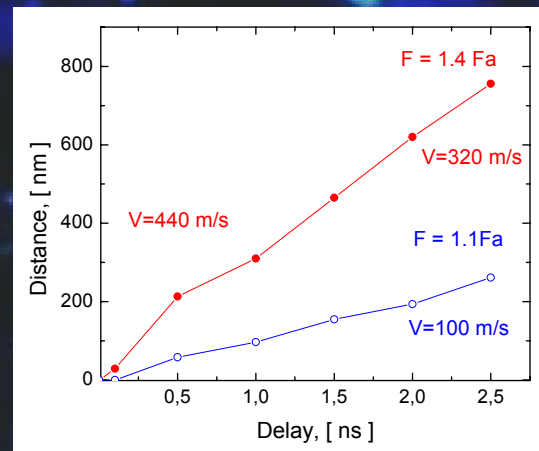
Адиабатический разлёт жидкого слоя с очень резкими границами $F = F_{abl1} > F_m$



Испарение поверхностного слоя $F = F_{abl2} > F_{abl1} > F_m$



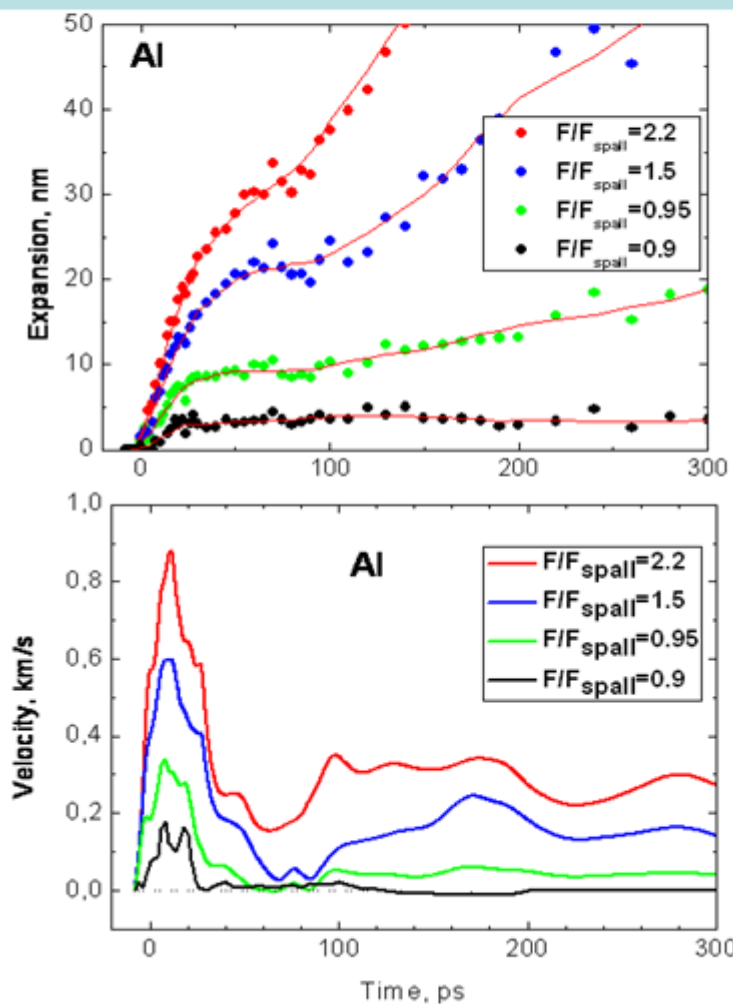
Характерная интерферограмма разлета



УДАРНО-ВОЛНОВЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ

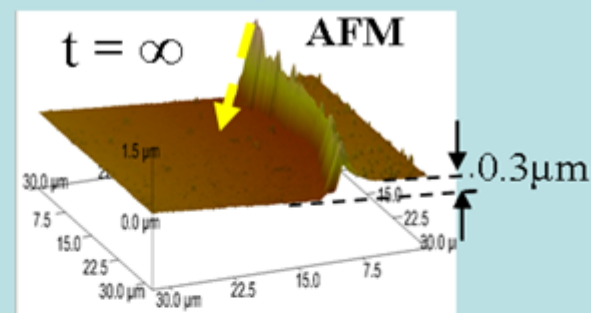
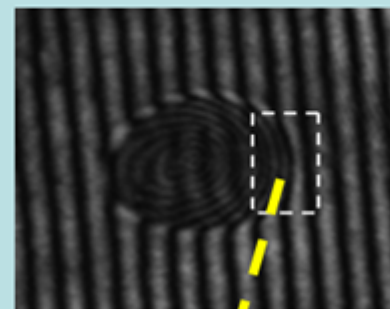
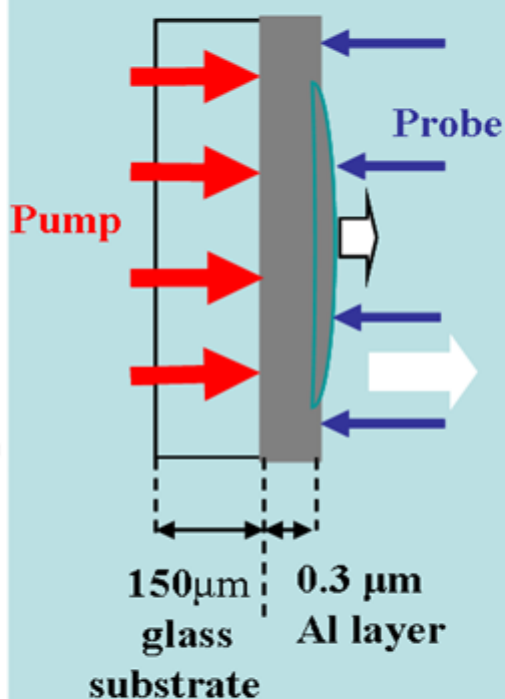
Прочность алюминиевой пленки при скорости деформирования 10^9 с^{-1}

Временные профили смещения и скорости свободной поверхности



Ti:S laser
40 fs; $5 \times 10^{13} \text{ W/cm}^2$

Откол на тыльной поверхности



$$\sigma = \frac{1}{2} \rho_0 c_0 \Delta U \approx 4.5 \text{ GPa}$$

Откольная прочность

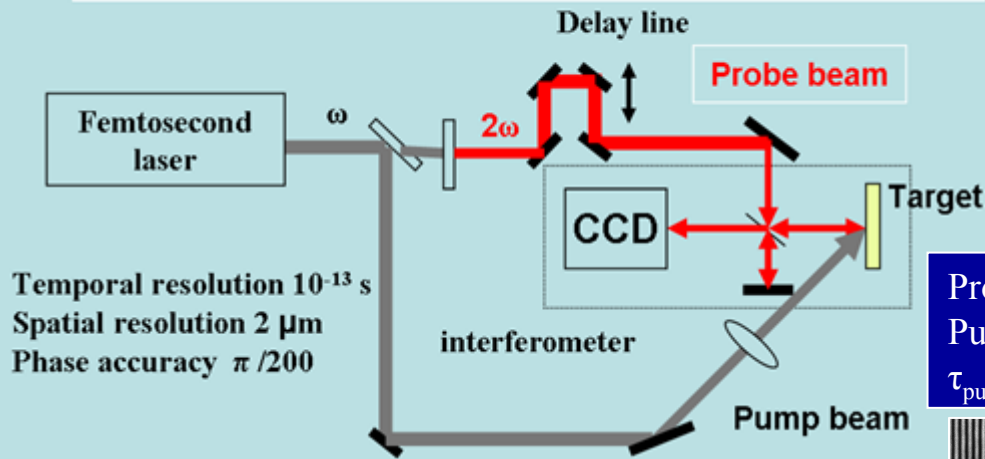
$$\dot{V}/V = \frac{\Delta U}{2c_0 \Delta t} \approx 10^9 \text{ s}^{-1}$$

Скорость деформирования

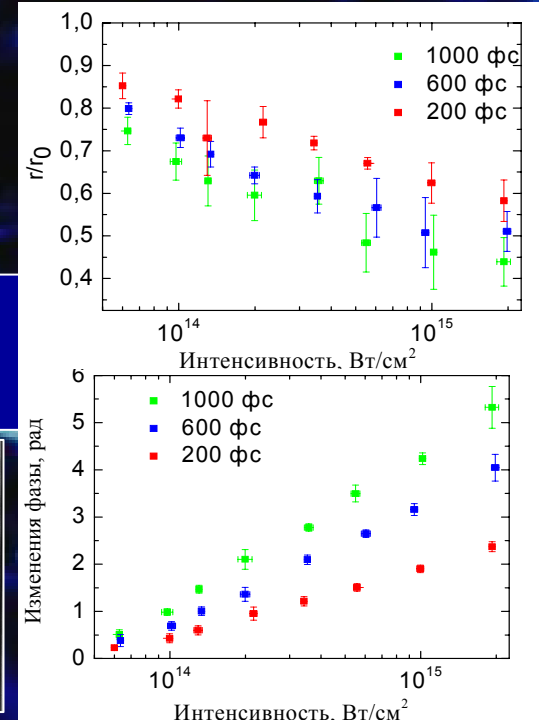
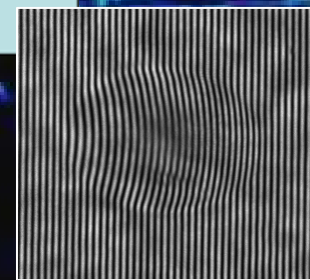
ИССЛЕДОВАНИЕ НЕИДЕАЛЬНОЙ ПЛАЗМЫ

Исследование неидеальной плазмы, мишень Al

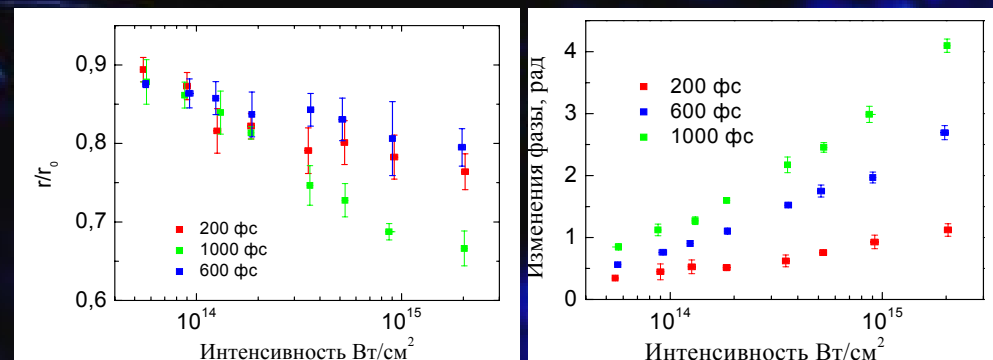
Femtosecond time-resolved interferometric microscopy



Регистрация изменений амплитуды и фазы комплексного коэффициента отражения

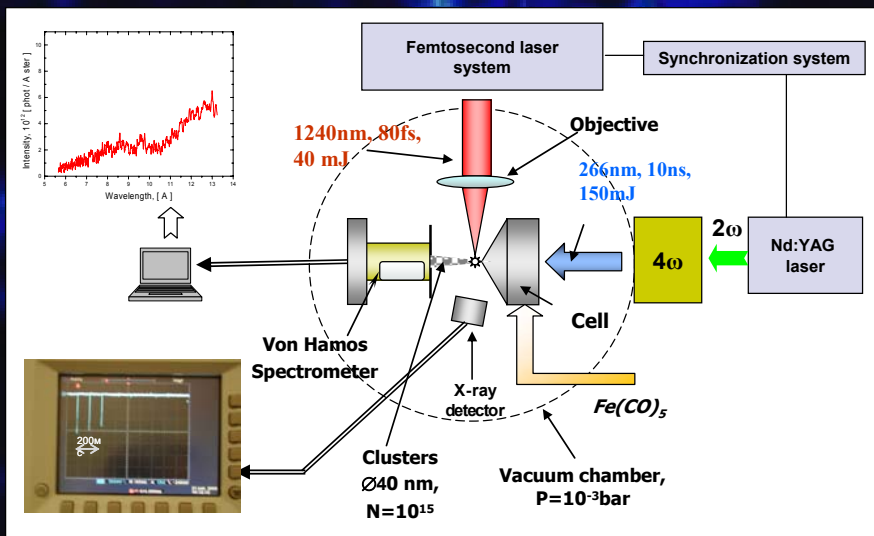


Исследование неидеальной плазмы, мишень Ag

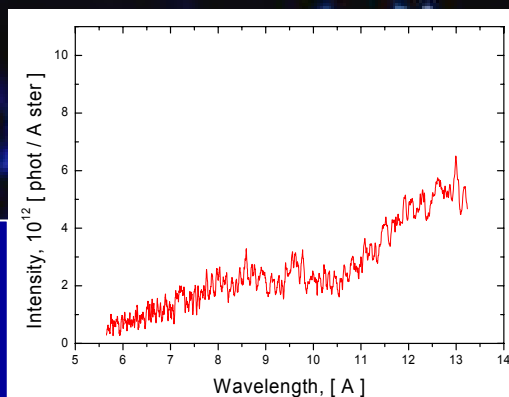


РЕНТГЕНОВСКОЕ ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ С КЛАСТЕРНЫМИ МИШЕНЯМИ

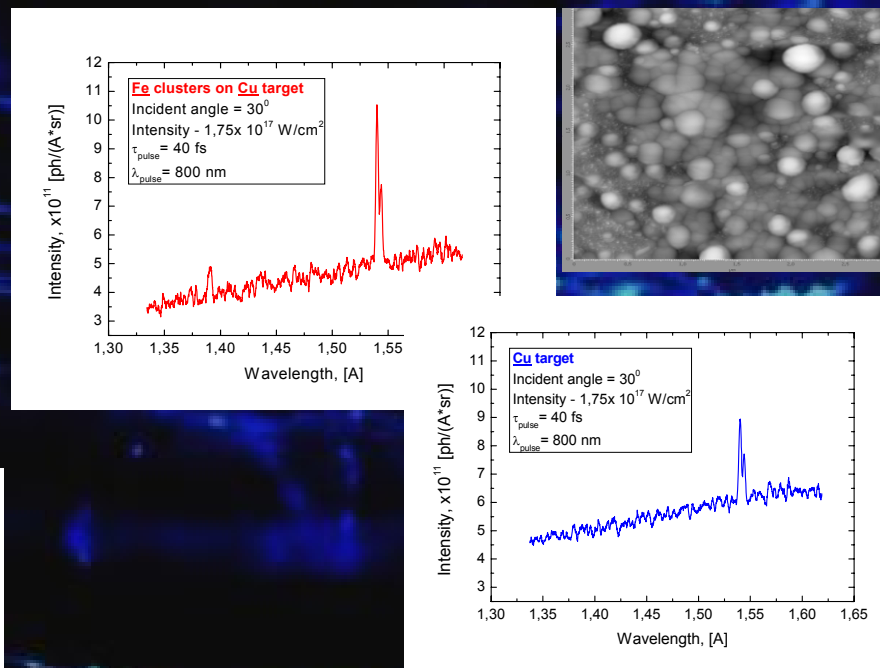
Взаимодействие мощных фемтосекундных импульсов с кластерами железа



Measured spectrum of X-ray radiation
($\Delta\lambda = 6 \div 13$ A)
(30 laser shots,
pulse energy $E=40$ mJ,
laser pulse duration 80 fs)



Генерация рентгеновского
характеристического излучения при
воздействии на кластерные мишени



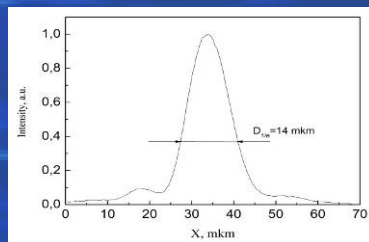
$K_{\alpha 1,2}$ and K_{β} radiation of Cu-solid target covered with Fe-clusters irradiated with the same laser. Cluster surface structure leads to the increase of the laser energy absorption and to the more effective conversion of laser energy in to the hot electron component. Energetic electrons penetrates „cold“ region of Cu causing K-shell radiation.

РЕНТГЕНОВСКОЕ ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ С НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫМИ МИШЕНЯМИ

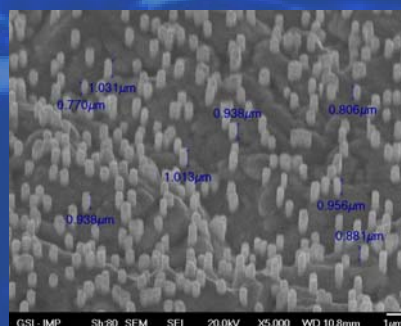
Ti:S laser: $\tau_L = 40$ fs; $I = 1.5 \times 10^{17}$ W/cm²

Намос

Spot $\varnothing = 14$ μ m



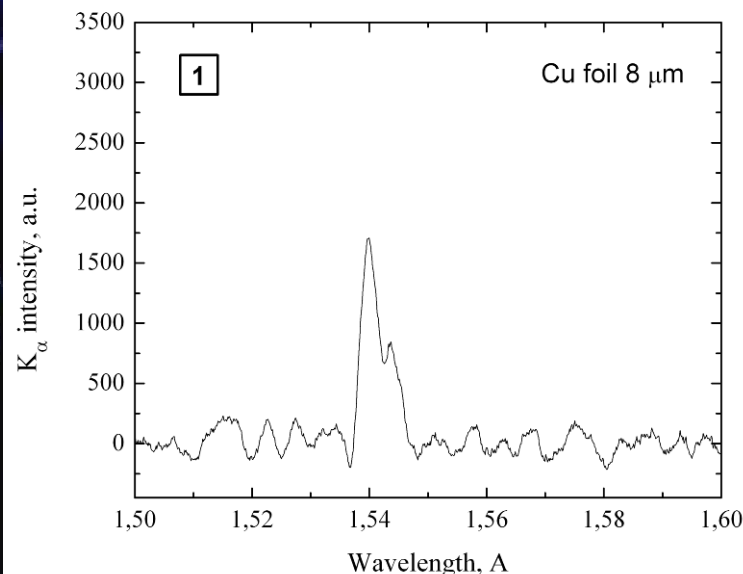
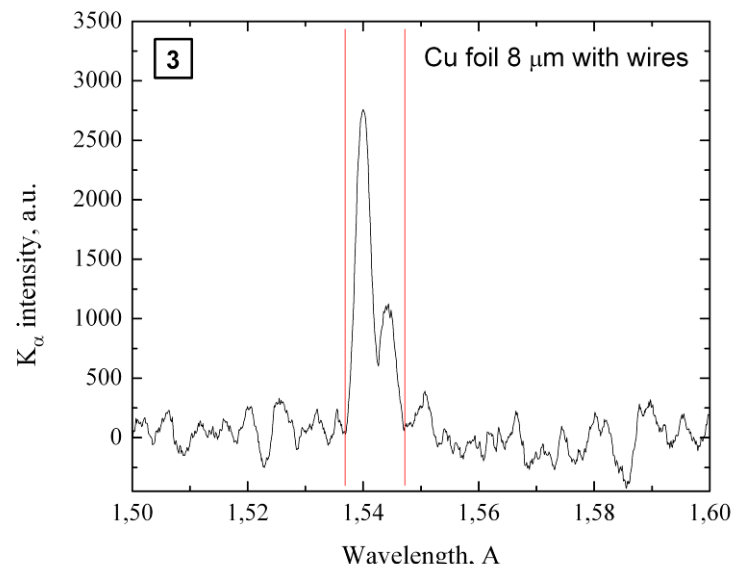
CCD



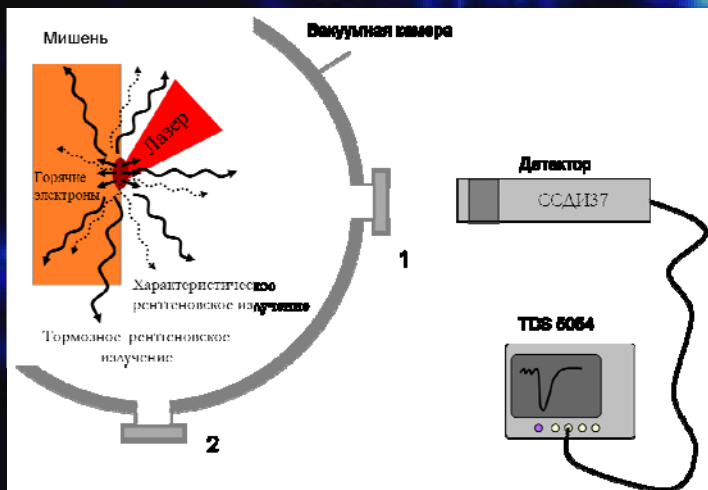
K_α yield

Cu nano-wire target (GSI, Germany)
 10^8 wires/cm², $\varnothing = 500$ nm \times 1 μ m

	Cu polished foil	Cu foil with wires	Increase of K_α yield
Measured K_α yield, phot·s/ster·pulse	$(0.95 \pm 0.2) \times 10^8$	$(1.6 \pm 0.2) \cdot 10^8$	1.7
Calculated K_α yield, phot·s/ster·pulse	0.7×10^8	1.2×10^8	1.8

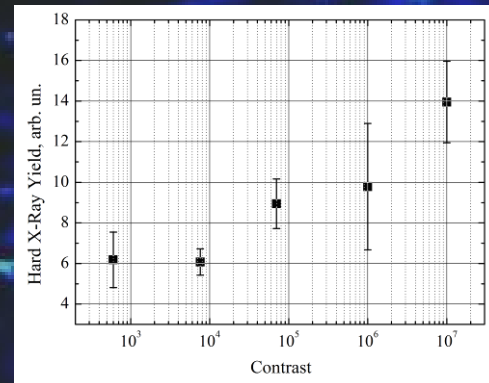


ИЗМЕРЕНИЕ ВЫХОДА ЖЕСТКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПЛАЗМЫ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ИНТЕНСИВНОСТИ И КОНТРАСТА ЛАЗЕРНОГО ИМПУЛЬСА

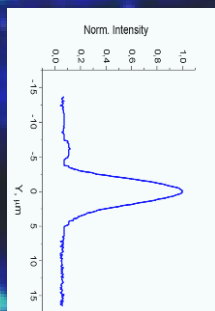
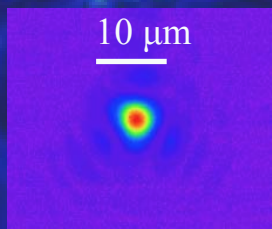
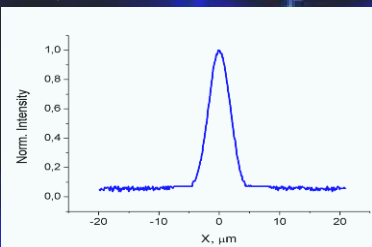


Зависимость выхода жесткого рентгеновского излучения от величины наносекундного контраста в области малых углов наблюдения относительно поверхности мишени.

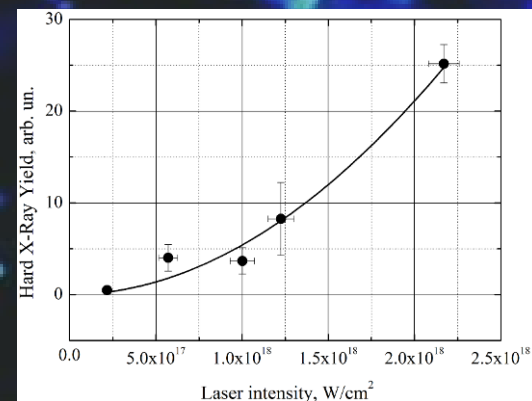
- Энергия ЛИ 5–50 мДж
- Интенсивность лазерного излучения на поверхности мишени $\sim 10^{18}$ Вт/см²



Распределение лазерного излучения на поверхности мишени

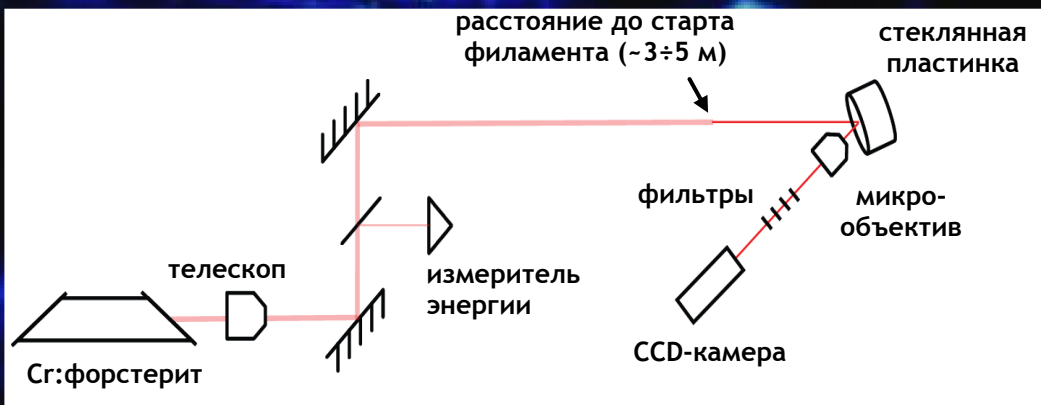


Зависимость выхода жесткого рентгеновского излучения от интенсивности лазерного импульса.



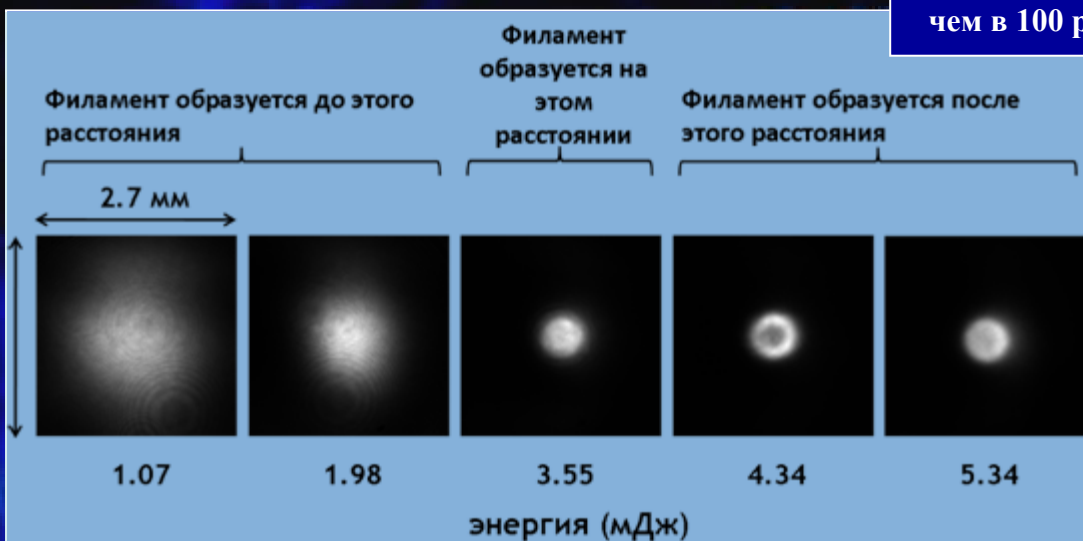
Выход жесткого рентгеновского излучения $\sim I^{1.9 \pm 0.3}$, где I – интенсивность лазерного излучения, Вт/см².

ФИЛАМЕНТАЦИЯ ФЕМТОСЕКУНДНОГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ДЛИНЕ ВОЛНЫ 1.24 МКМ В ВОЗДУХЕ



Импульс в эксперименте: длина волны **1.24 мкм**
длительность **80 фс**
радиус (после телескопа) **1.5 мм**
энергия **0.6÷5.7 мДж**

- Радиус филамента на длине волны 1.24 мкм более чем в 10 раз превышает размер филамента на $\lambda=0.8$ мкм
- Величина переносимой филаментом на $\lambda=1.24$ мкм энергии более чем в 100 раз превосходит энергию, переносимую на $\lambda=0.8$ мкм

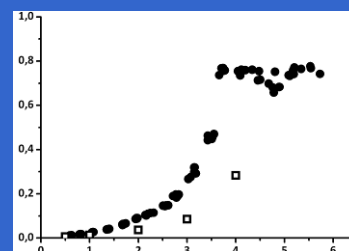


Пиковая плотность энергии в пучке

Измерительный стенд на расстоянии

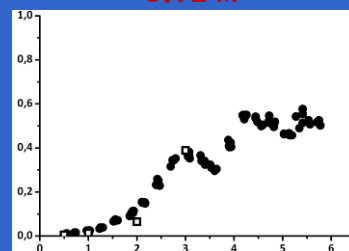
пиковая плотность энергии (Дж/см²)

3.12 м



энергия (мДж)

5.92 м

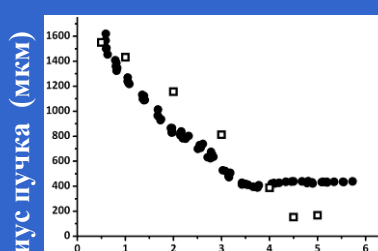


энергия (мДж)

Радиус пучка

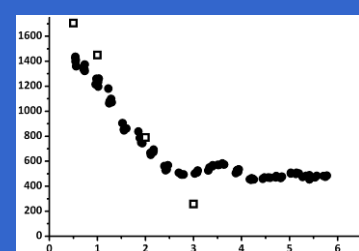
Измерительный стенд на расстоянии

3.12 м



энергия (мДж)

5.92 м

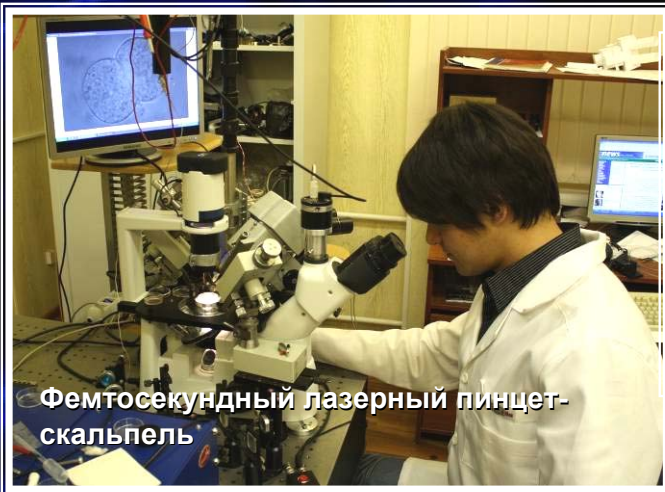


энергия (мДж)

● - эксперимент

□ - теория

Биомедицинский технологический комплекс



Фемтосекундный лазерный пинцет-скальпель



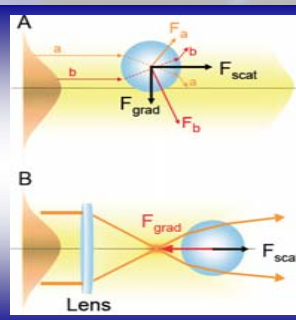
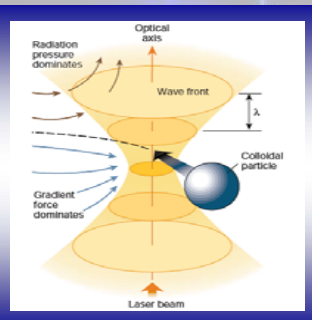
Наносекундный лазерный пинцет-скальпель Carl Zeiss PALM CombiSystem

Технологии:

- оптической трансфекции – создание биологических микроконтейнеров с активным веществом
- оптического позиционирования живых клеток для создания тканевых эквивалентов (тканевая инженерия)

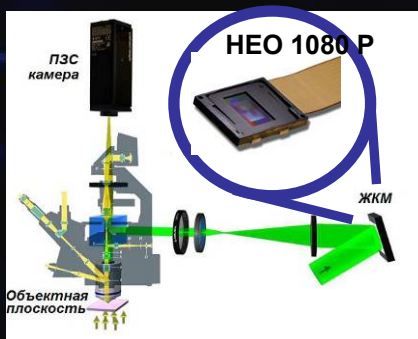
- клеточной хирургии в области оптической модификации и селективной гибридизации клеток
- диссекции и слияния нейронов
- бесконтактной биопсии эмбрионов

Физические основы захвата частицы оптической ловушкой



Применение ЖК-модулятора для:

- Формирования с профилем интенсивности, отличным от гауссового;
- Динамического управления параметрами и положением оптических ловушек



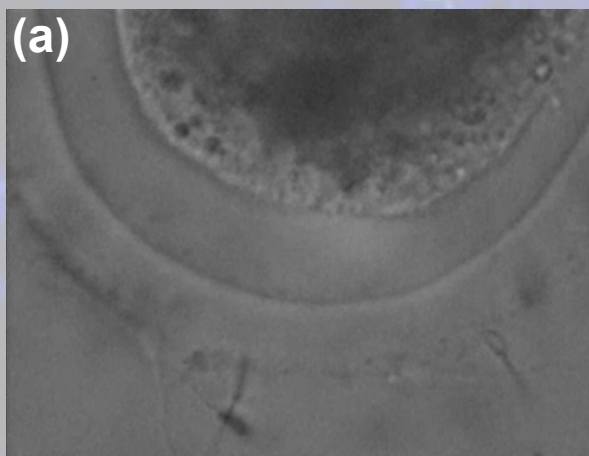
Разрешение	1920x1080
Размер пикселя	8.0 мкм
Размер панели	0,7"
Частота работы	60 Гц
Управление	8-бит. сигнал
Глубина фаз. модуляции	2π на λ=400-700нм

Захват, манипулирование и модификация одного или множества нано- и микрообъектов размерами от 100 нм до 100 мкм в трёхмерном пространстве.

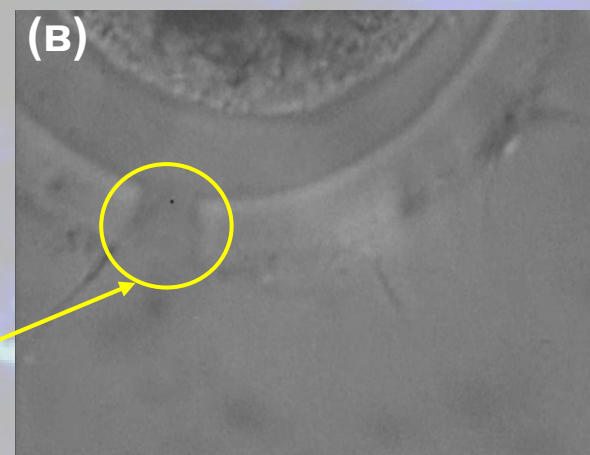
Фемтосекундный лазерный скальпель позволяет проводить рассеечение биообъектов с нанометровым разрешением.

Репродуктивные технологии в биологии и медицине

1. Технология экстракорпорального оплодотворения на основе интегрированной системы оптического пинцета - скальпеля



Зона перфорации
лазерным скальпелем



захват сперматозоида
оптическим пинцетом



перемещение сперматозоида
к полости в оболочке



сперматозоид внутри
яйцеклетки

Репродуктивные технологии в биологии и медицине

2. Биопсия бластомера или редукционного тельца для предимплантационной диагностики генетических заболеваний

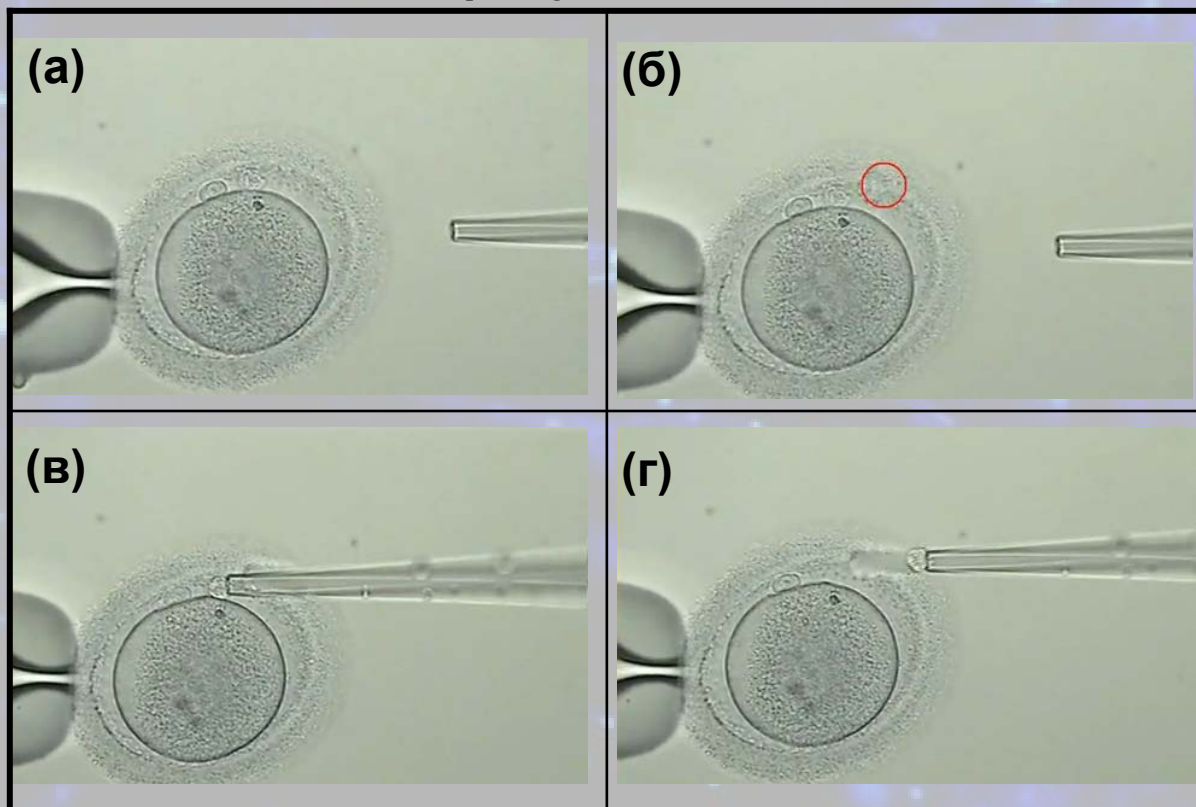
Предназначена для:

✓Выявления серьезных генетических заболеваний плода (синдром Альпорта, муковисцидоз, талассемия, гемофилия типов А и В, врожденный дефицит альфа-1-антитрипсина)

✓Определения пола

✓Хромосомного анализа на наличие синдрома Дауна (особенно важно в случаях беременностей у женщин старше 35 лет)

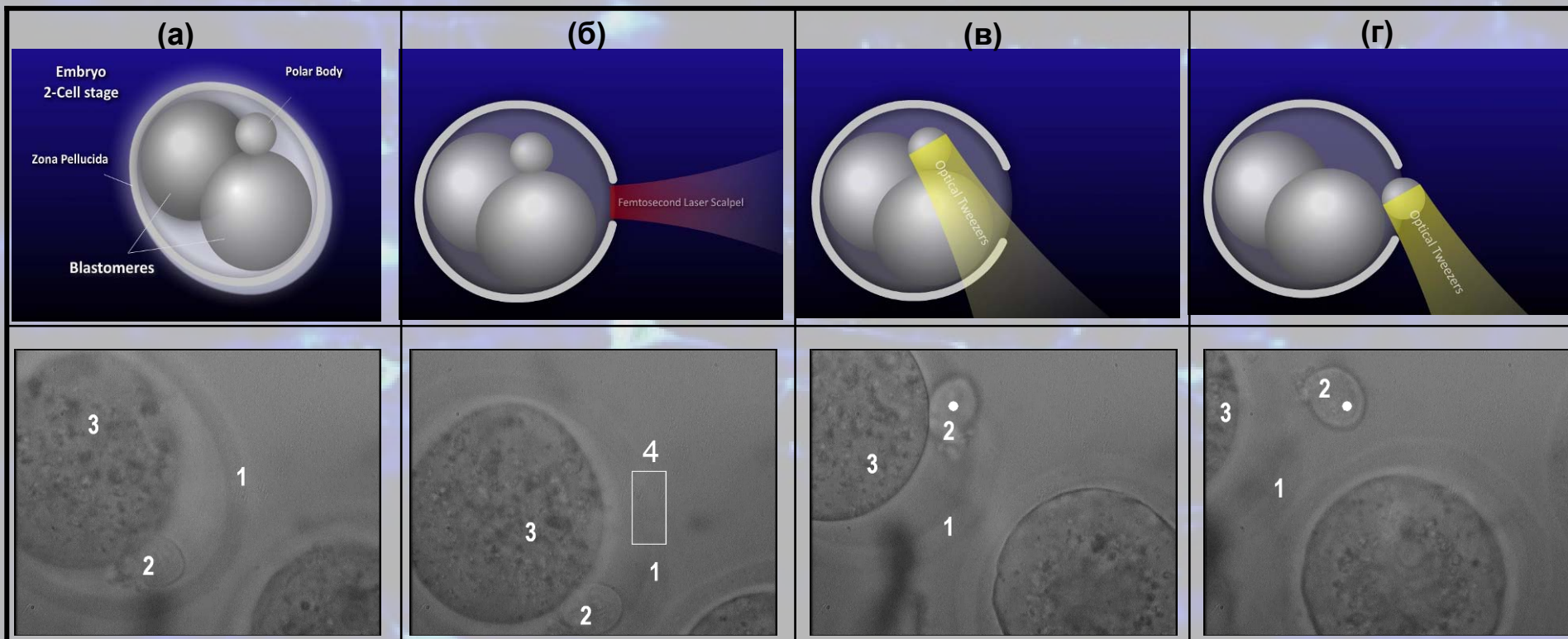
Стандартная «контактная» процедура биопсии редукционных телец



В настоящее время процедура биопсии, проводимая в клиниках ЭКО, является контактной, т.к. основана на механическом воздействии на эмбрион.

Репродуктивные технологии в биологии и медицине

Демонстрация технологии оптической биопсии эмбриона животного



1- зона пеллюцида, 2 – редукционное тельце, 3 – бластомер, 4 – область воздействия лазерного скальпеля

(а) – наведение фемтосекундного лазерного скальпеля на выбранный участок внешней оболочки эмбриона,

(б) – перфорирование оболочки,

(в) – захват редукционного тельца с помощью оптического пинцета,

(г) – выведение редукционного тельца за пределы эмбриона (клетка проходит через перфорированную оболочку).

Параметры оптического пинцета:

$$P \leq 1W; \quad \lambda = 1.06\mu m; \quad d \approx 2\mu m;$$

Параметры оптического скальпеля:

$$\tau = 100 fs; \quad E \leq 100\mu J; \quad \lambda = 620nm; \quad d \approx 0.9\mu m;$$

Репродуктивные технологии в биологии и медицине

Технология оптической биопсии трофэктодермы эмбриона на стадии хэтчинга

Трофэктодерма (ТД) - наружный слой клеток у зародышей млекопитающих, обеспечивает контакт зародыша с материнским организмом; участвует в имплантации зародыша в стенку матки и образовании плаценты.

Преимущества биопсии трофэктодермы

✓ В клетках трофэктодермы содержится генетическая информация как, матери, так и отца, в отличие от редукционного тельца, содержащего исключительно генетическую информацию матери

✓ Эффективность биопсии ТД в меньшей степени определяется индивидуальными свойствами эмбриона, в отличие от биопсии редукционного тельца (в последнем случае сила связи полярного тельца и бластомера значительно влияет на возможность проведения биопсии)

✓ В случае биопсии ТД может быть изъято большее количество клеток (без последствий для дальнейшего развития эмбриона), а, следовательно, точность предимплантационной диагностики может быть повышена.



Клеточная хирургия с использованием лазерных технологий

3. Технология оптической гибридизации клеток

Цель: получение клеток с новыми свойствами (в частности, для селекции животных, растений и т.д., применение в фармацевтике для производства новых препаратов)

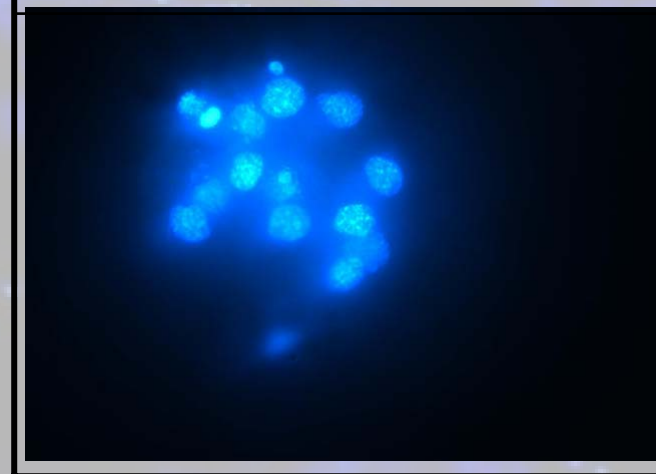
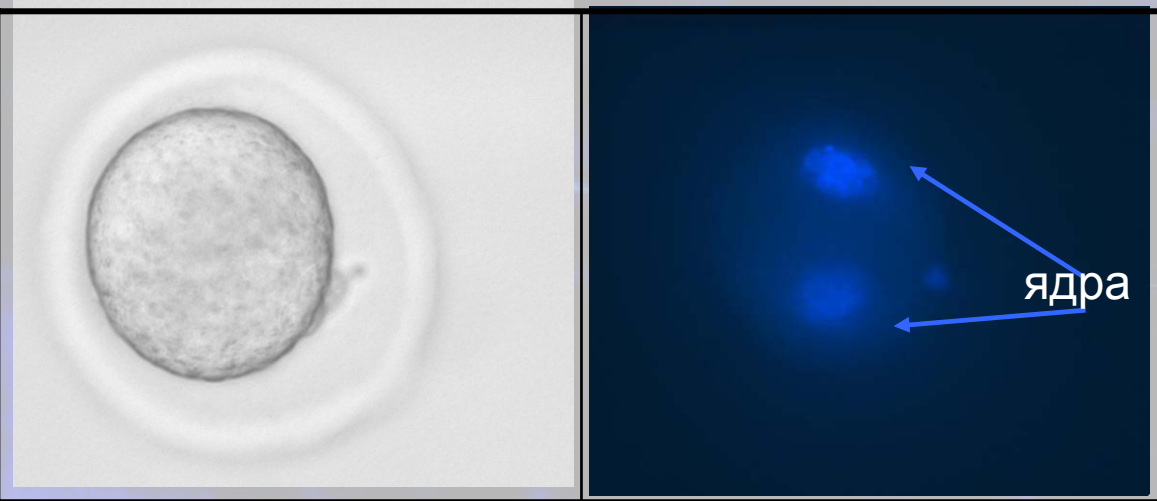
Преимущества технологии:

- ✓ Высокая избирательность технологии по сравнению с существующими методиками (процедуре слияния могут быть подвержены две конкретно выбранные клетки, а не вся культура клеток)
- ✓ Бесконтактный метод
- ✓ Возможность управления и контроля процесса в реальном времени

Наглядное подтверждение факта гибридизации клеток

Добавление флуоресцентного красителя подтверждает наличие в гибридной клетке двух ядер

Процедура лазерной гибридизации является щадящей и не снижает темпов развития клеток (наличие большого количества ядер в эмбриональной клетке подтверждает возможность развития клеток, подвергнутых данной процедуре)



Клеточная хирургия с использованием лазерных технологий

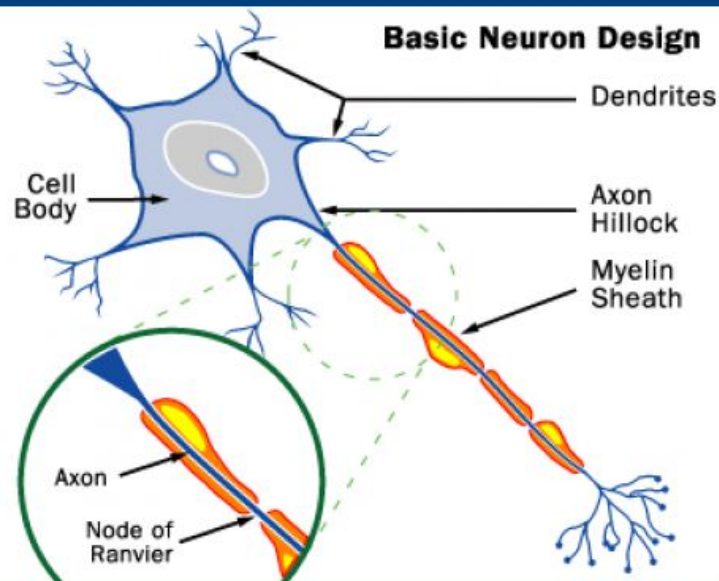
4. Слияние нейронов

Направлено на восстановление функциональности нервной ткани, поврежденной при травмах и авариях.

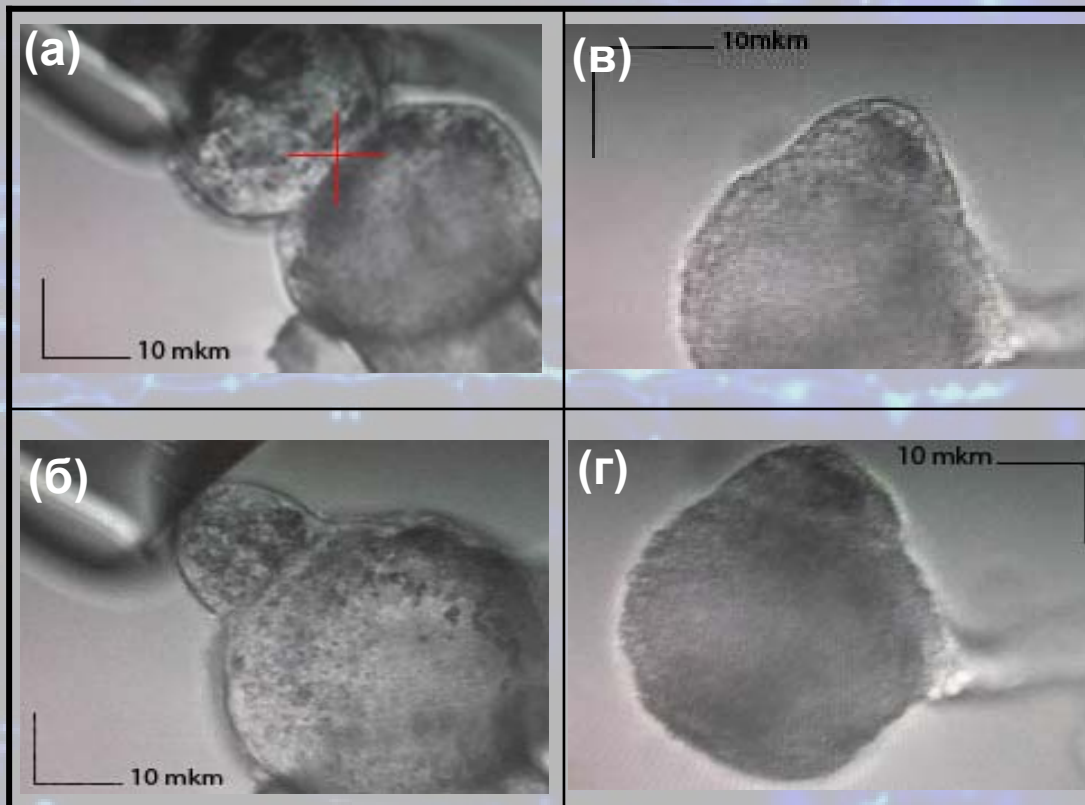
Применение технологии оптического скальпеля:

- снижает риск повреждения клеток, так как лазерное воздействие локализовано во времени и пространстве
- позволяет проводить слияние нейронов быстро и предельно контролируемо.

Строение нейрона



Слияние нейронов с помощью фемтосекундных лазерных импульсов

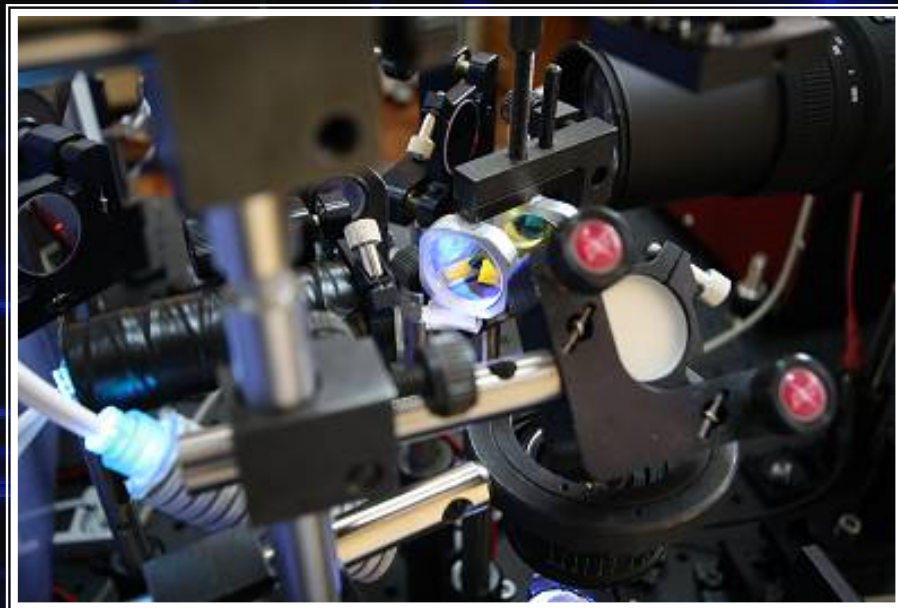


+ - координаты воздействия лазерного импульса

Параметры оптического скальпеля:

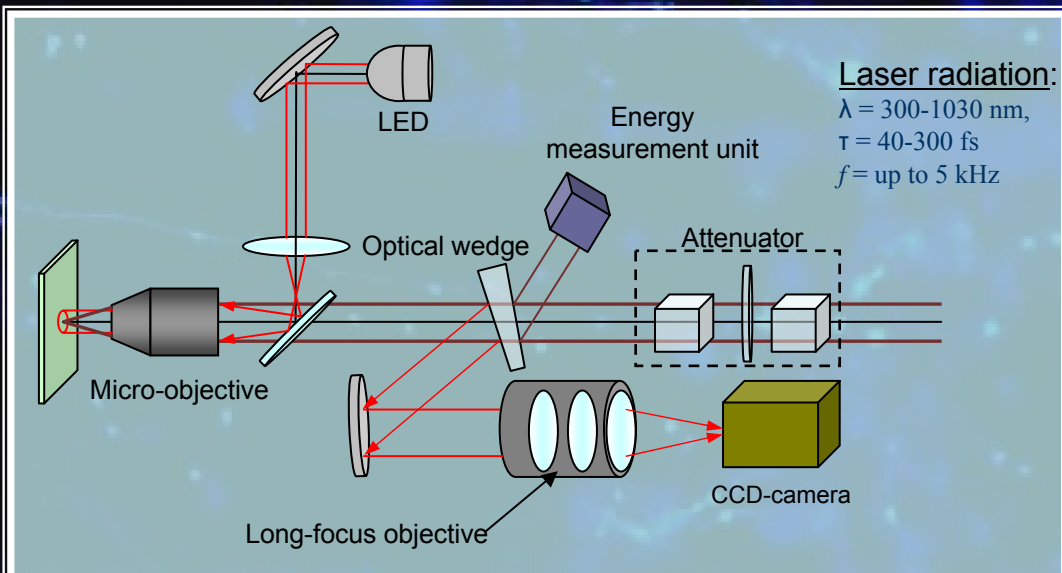
$\tau = 100 \text{ fs}$; $E \leq 100 \mu\text{J}$; $\lambda = 620 \text{ nm}$; $d \approx 0.9 \mu\text{m}$;

ЛАБОРАТОРНЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС ФЕМТОСЕКУНДНОЙ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ



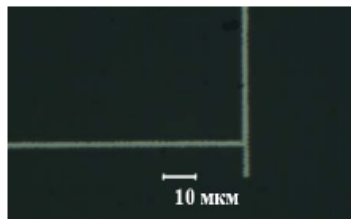
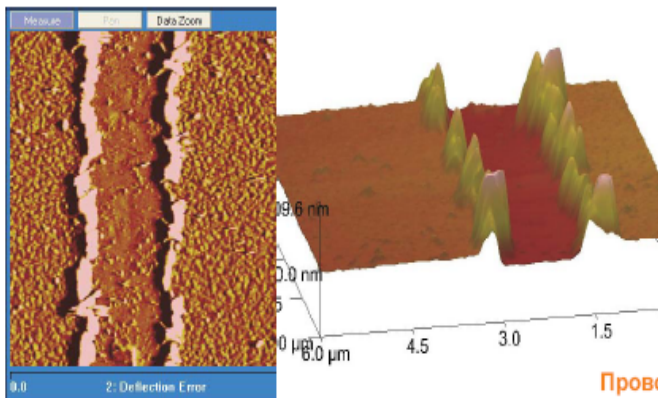
Технологии:

- Формирование отверстий на глубину от 10 нм до 100 мкм;
- Формирование пазов на глубину от 10 нм до 100 мкм;
- Удаление нанослоев материала толщиной от 10 до 1000 нм
- Формирование наноструктур на поверхности элементов интегральных схем с высотой ~ 50 нм.



ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ ТОНКОПЛЁНОЧНЫХ ПОКРЫТИЙ

Селективная абляция проводящего слоя для создания электронных плат

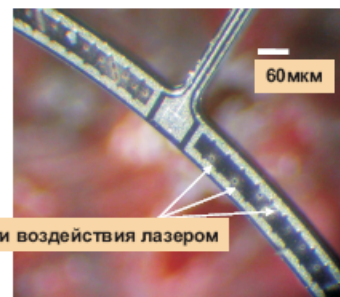


Тонкопленочная мишень Au на стеклянной подложке после обработки. Фото на просвет.

Проводимость слоя золота поперек канавки $\sim 1E-11$

Создание канавки шириной в **1.6 мкм** в поверхностном слое золота толщиной **65 нм** с целью разрыва проводящего слоя

Точная балансировка электронных гироскопов

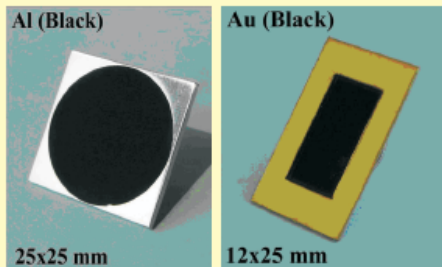


Области воздействия лазером

Точечная абляция отдельных элементов металлической структуры на кремниевой подложке.

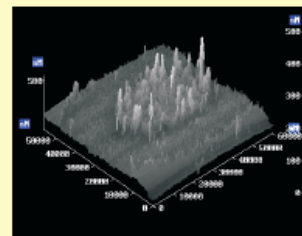
Наноструктурирование поверхности металлов и полупроводников

Примеры “черного” алюминия и золота, полученные при заполнении поверхности наноразмерными структурами

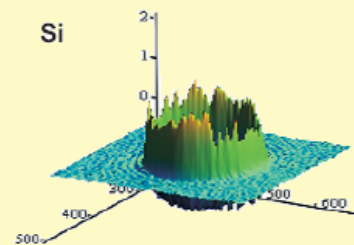


Создание полностью поглощающих поверхностей

Получение “черного” кремния с помощью фемтосекундных лазерных импульсов.



Атомный микроскоп

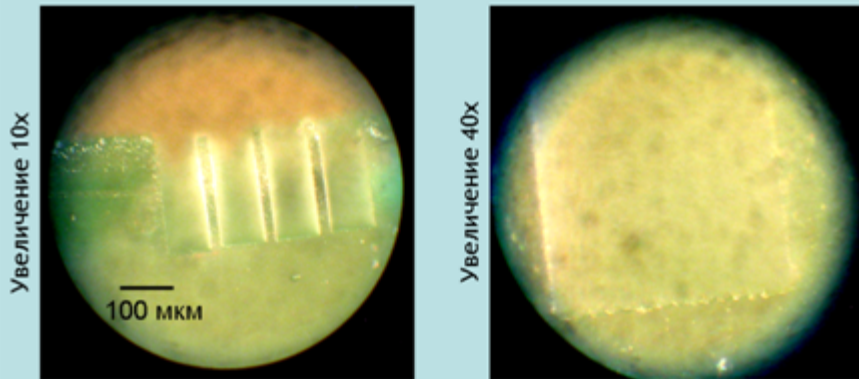


Интерферограмма

Повышение эффективности солнечных батарей

ФЕМТОСЕКУНДНЫЕ ЛАЗЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Обработка полимеров

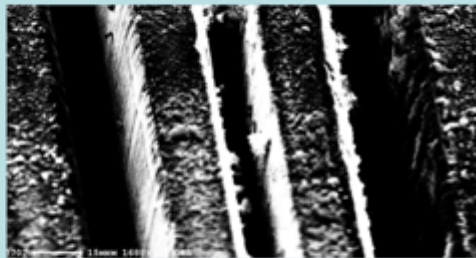
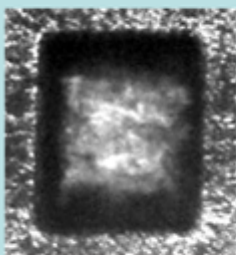


Формирование «колодцев» под оптическое волокно

Фотографии сделаны на краю образца для контроля формы образующихся колодцев. Каждому колодцу соответствуют свои параметры обработки (энергия, расстояние между слоями Δz).

Technology of processing of transparent dielectrics (diamond, quartz)

The main features of femtosecond processing - sharp borders of microprofiles and microholes in wide range of materials



Quartz
500x500 μm ,
depth – 150 μm

Diamond plate
Slots: width 10-20 μm , depth 25-50 μm

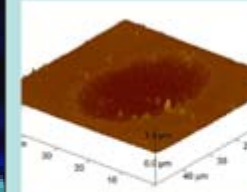
Accuracy of borders of profiles and apertures - to 100 nm

Selective Ablation feasibility

Ablate Top layer (Metal) only 200 nm
No Damage of lower layer.

Metal(Mo+Al+Mo), 200 nm
Insulation layer(SiNx), 300 nm
Metal(Al+Mo), 300 nm

Glass

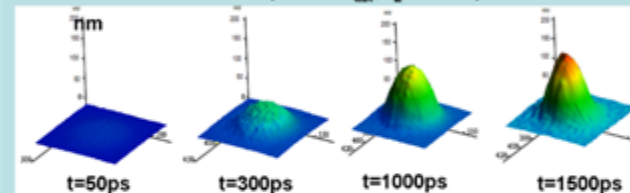


Characteristic of ablation crater (two shots) were measured using atomic force microscope – AFM (Right).

Cross section (Left).

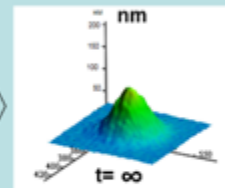
Формирование наноструктур на поверхности металлов под действием фемтосекундных лазерных импульсов.

Dynamics of expansion of Al target surface near the ablation threshold ($F=0.95F_{\text{ab}}$; $\tau_L = 100\text{fs}$)



(ultrafast imaging interferometry measurements)

The residual surface deformation of Al



Наноструктурированная с помощью фемтосекундных лазерных импульсов поверхность золота (а) толщиной 60 нм каждого «нановыступа» (b)

[J. Koch, F. Korte et al. Nanotexturing of gold films by femtosecond laser-induced melt dynamics Appl. Phys. A 81, 325–328 (2005)]

