

# Излучение и вещество

Практический курс оптического эксперимента

Б. А. Князев, В. С. Черкасский

Электронная учебно-методическая разработка

Новосибирский государственный университет  
Кафедра общей физики

2012

## Аннотация

Данный курс предназначен для студентов младших курсов физического факультета НГУ, записавшихся на экспериментальный факультатив «Излучение и вещество». Презентация содержит сведения, которые получают студенты на трех вводных лекциях курса, а также материал для самостоятельной работы студентов в процессе работы над индивидуальными экспериментальными заданиями.

Курс «Излучение и вещество» ставит в качестве основной цели освоение наиболее подготовленными студентами младших курсов принципов и методов проведения эксперимента в условиях реального научного исследования на примере конкретной физической задачи, соответствующей программе базового курса общей физики. После трех вводных лекций каждый студент получает индивидуальную экспериментальную задачу, углубленно изучает один из избранных разделов физики, знакомится с теорией, приборной базой, техникой эксперимента, методами обработки данных, численным моделированием явления или процесса. Главной задачей студента является выполнение экспериментов на лазере на свободных электронах с использованием самого современного оборудования и по самым актуальным темам, обработка полученных данных и создание научного отчета о работе.

# Излучение

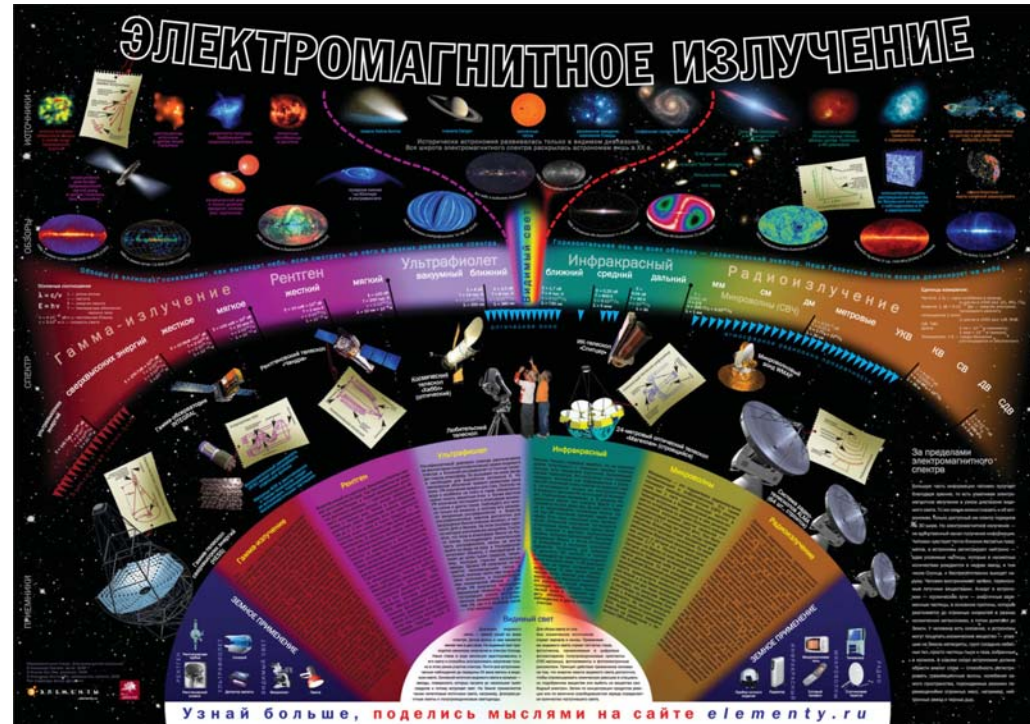
- Свет от доисторических времен до наших дней



- Открытие электромагнитных волн
- От волн к квантам
- Дуализм волна – фотон

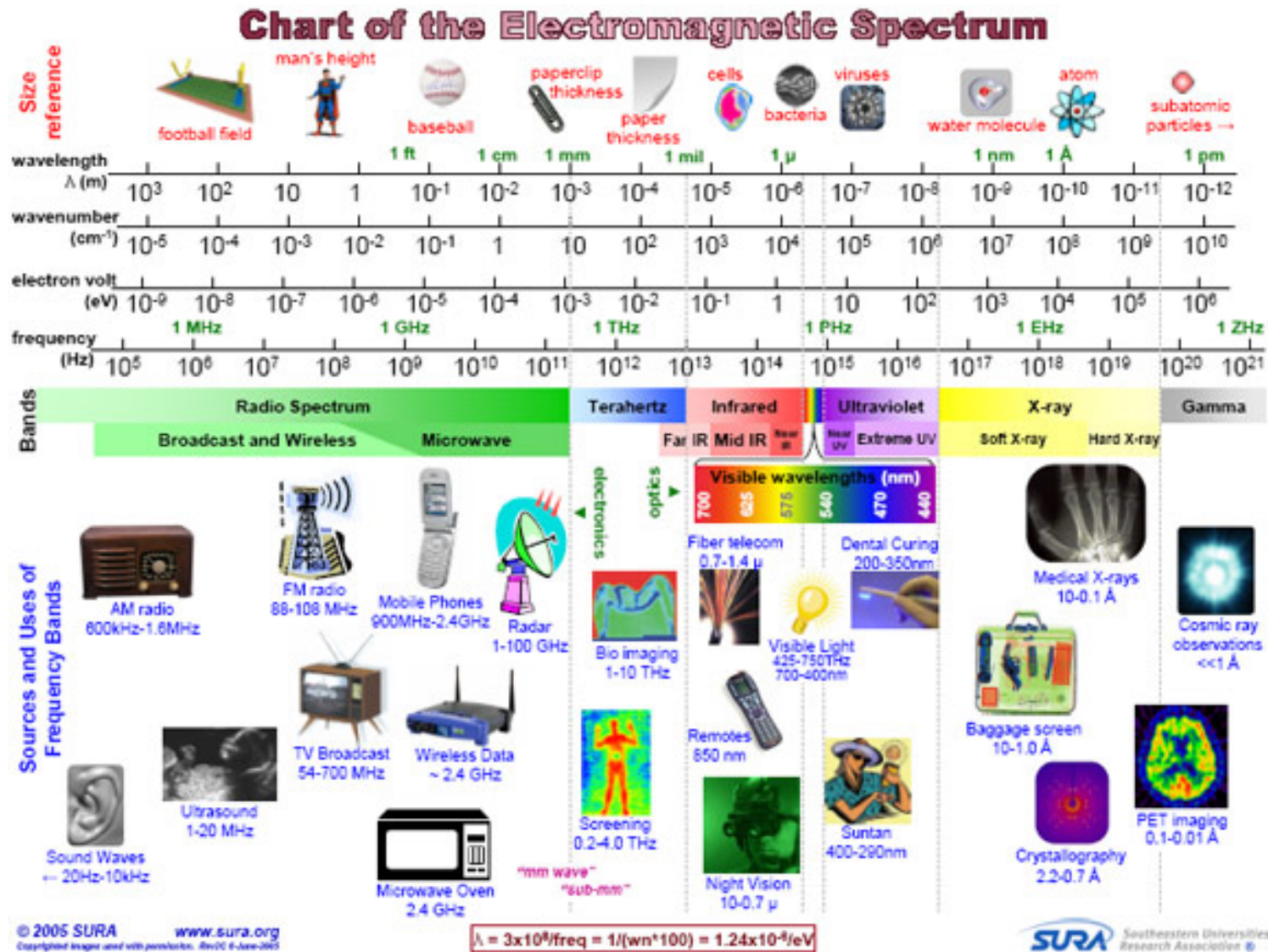


# Что было бы, если бы окно прозрачности атмосферы было не в видимом диапазоне



- Фотосинтез
- Спектральная чувствительность глаза
- Парниковый эффект

# Использование излучения в науке и технике



$\lambda$ - длина волны,  $\nu = 1/\lambda$  – волновое число, E – энергия фотона, f – частота ЭМ колебаний  
**Дуализм: фотон – волна (об этом - далее)**

# Зрение как наиболее информативный орган чувств

## История развития оптики и познание мира

- Огни святого Эльма
- Свет молнии
- Свечение гнилушек
- Миражи
- «Зеленый луч»
- «Корабли пришельцев»
- «Святые с нимбами»  
на улицах Академгородка  
и многое другое



– Излучение как источник открытий и заблуждений

# История развития оптики и познание мира

- Архимед сжигает римские корабли (история или легенда?)

<http://cyclowiki.org/wik>



- Древнеримская чаша Ликурга – практическая нанооптика

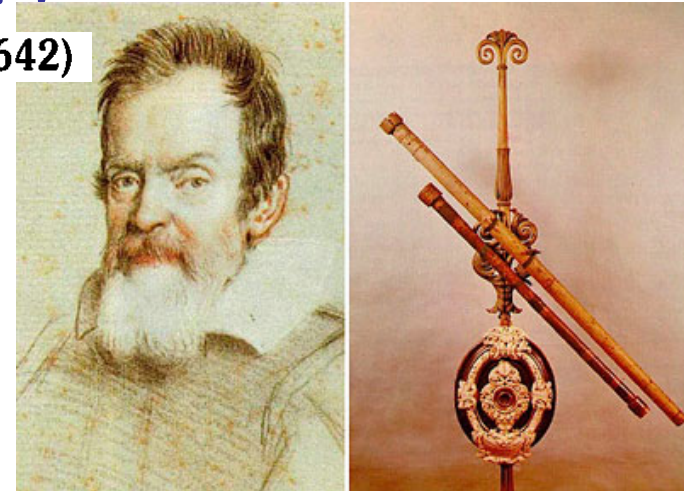
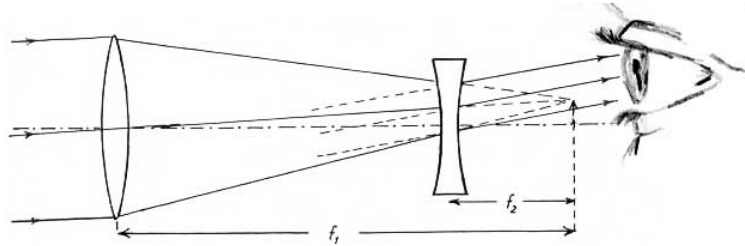




# Оптические инструменты

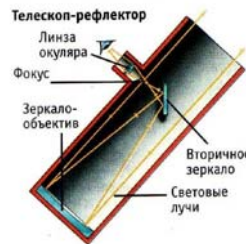
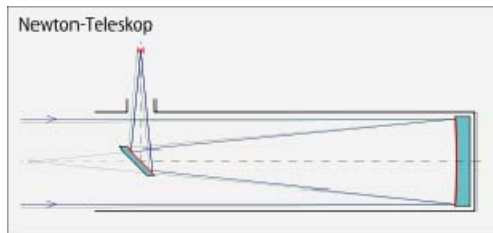
Galileo Galilei (1564–1642)

- Галилей – телескоп-рефрактор



Isaac Newton (1642–1727)

- Ньютон – телескоп рефlector



Телескоп Хаббл



- Левенгук (1632-1723) – микроскоп эритроциты, бактерии...

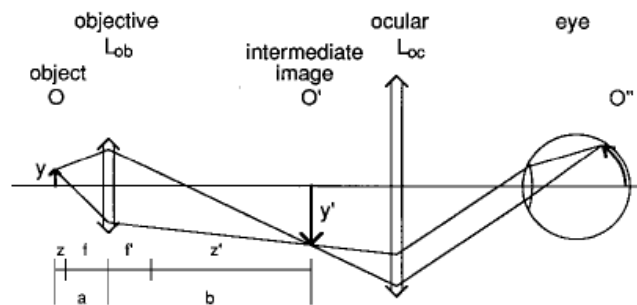
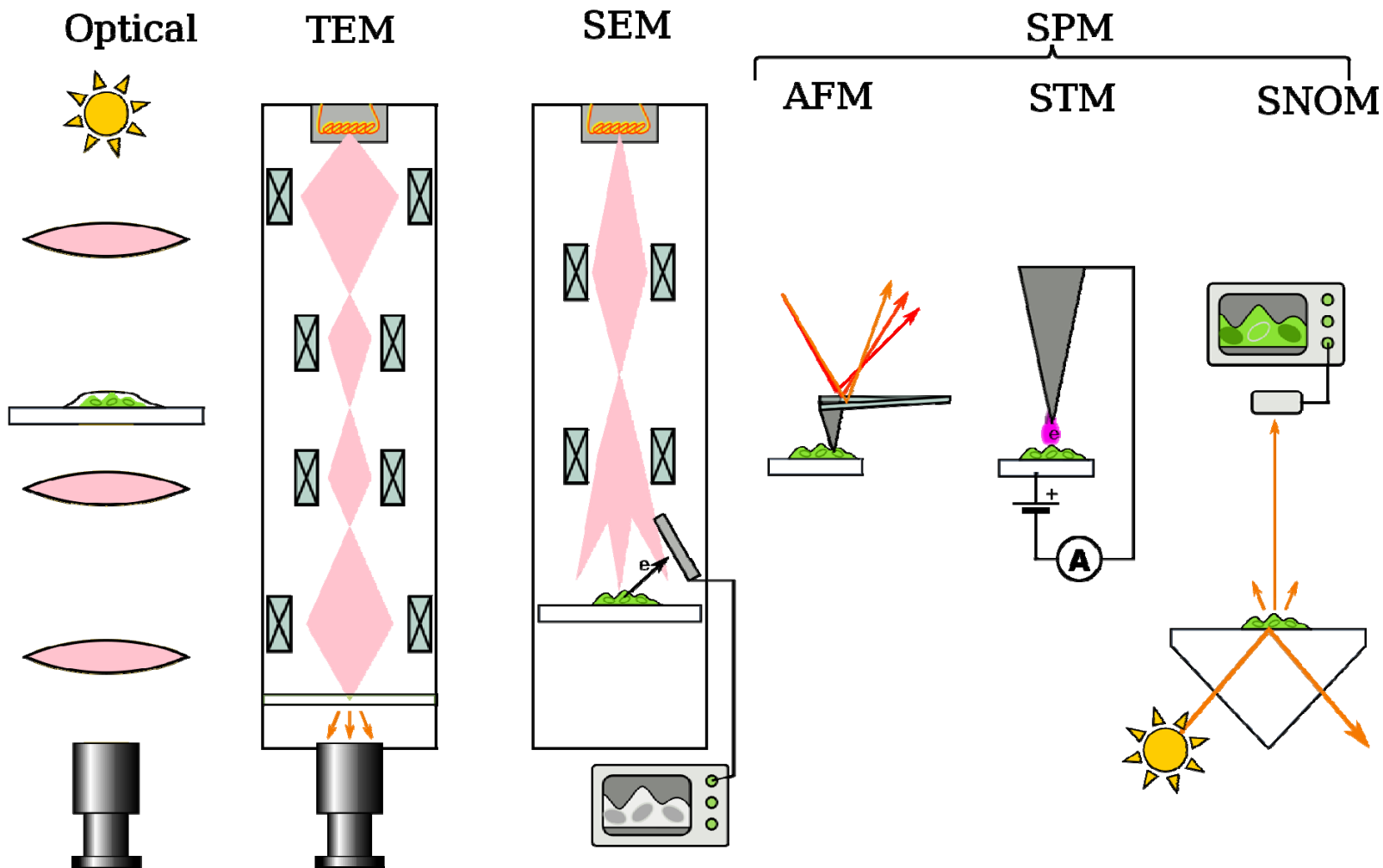


FIGURE 3 Ray path in the microscope from object to observer's eye (see text).



# Микроскопы: от оптического к электронному и далее к ближнепольным микроскопам

## Microscopes



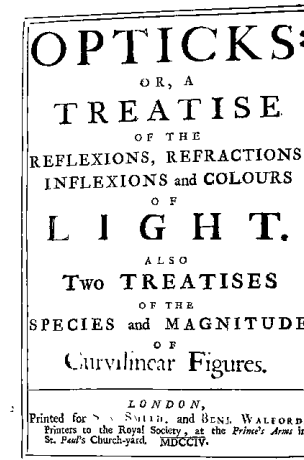
# Волновая и корпускулярная теории света

**Christian Huygens (1629–1695)**

- Гюйгенс – волновая теория света (1678)

**Isaac Newton (1642–1727)**

- Исаак Ньютон – спектр, корпускулярная теория света



**Leonard Euler (1707–1783)**

**Benjamin Franklin (1706–1790)**

- Эйлер, Франклин – отвергали корпускулярную теорию

**Thomas Young (1773–1829)**

**Augustin Jean Fresnel (1788–1827)**

- Юнг, Френель – Интерференция, дифракция – волновая теория

**Jean Bernard Léon Foucault (1819–1868)**

- Фуко – Измерение скорости света в среде и вакууме: окончательное поражение корпускулярной теории

# Теория электромагнетизма, ЕМ волны

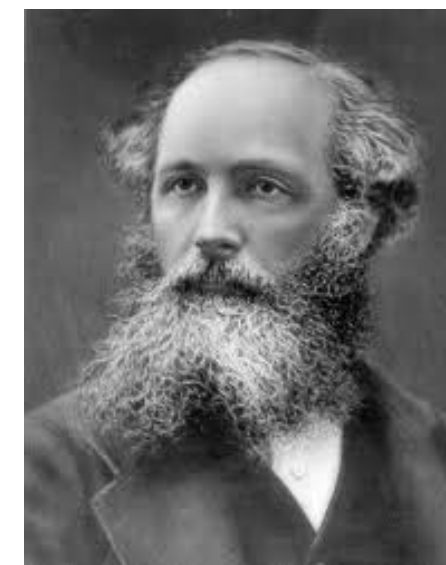
## Michael Faraday (1791–1867)

- Фарадей
  - Установил связь между электричеством и магнетизмом
  - Открытие вращения плоскости поляризации света в магнитном поле привело к ассоциации света с электромагнитным полем (1845)



## James Clerk Maxwell (1831–1879)

- Максвелл
  - создал теорию электромагнитного поля (уравнения Максвелла)
  - Ввел понятие о токе смещения
  - Предсказал существование электромагнитных волн
  - Выдвинул идею электромагнитной природы света.



## Генрих Герц: открытие электромагнитных волн

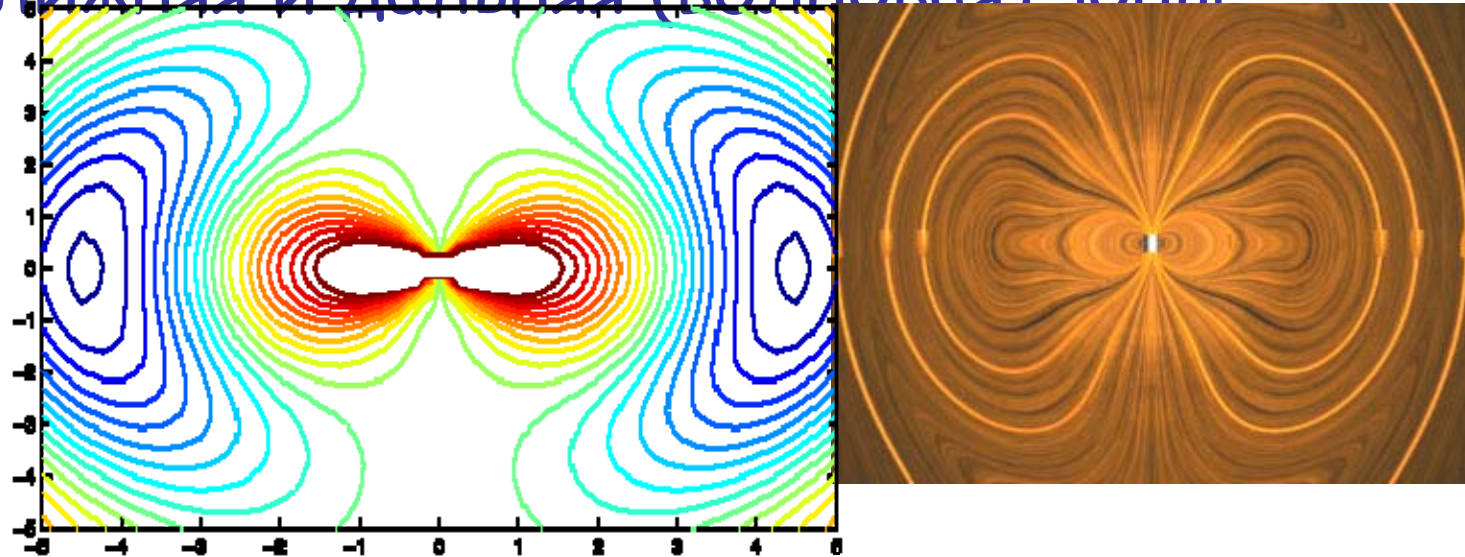
# Heinrich Rudolf Hertz

- 1888
- «discovers and measures the waves, radio waves, predicted earlier by Faraday and Maxwell».
- «he proved that electricity can be transmitted in electromagnetic waves which led to the development of wireless telegraph and the radio».

We can construct a dichroic polarizer by stringing a set of wires as shown in Figure 13-1. Heinrich Hertz invented this type of polarizer in 1888 to study the properties of microwaves.



## Излучающий диполь: ближняя и дальняя (волновая) зоны



[http://ocw.mit.edu/ans7870/8/8.02T/f04/visualizations/light/01-DipoleRadiation/01-Dipole\\_320.html](http://ocw.mit.edu/ans7870/8/8.02T/f04/visualizations/light/01-DipoleRadiation/01-Dipole_320.html)

Здесь картинка из Мариона!!! Формула для ближней и дальней зон!

А так же анимация с излучающим диполем

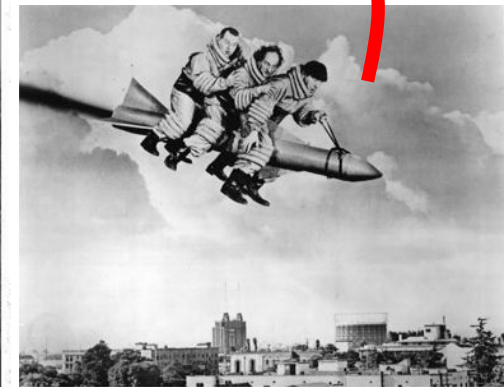
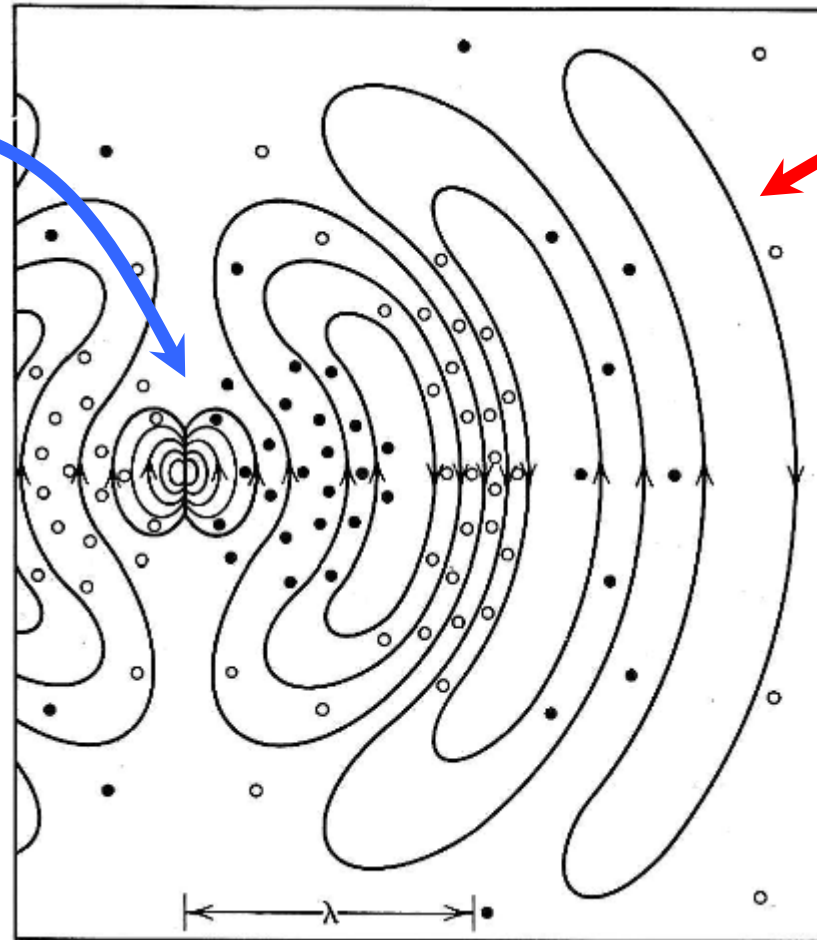
О поляризации света

Картинки E-H поля в волнах разной поляризации

# Non-radiative transfer takes place in the **near field** of an oscillator



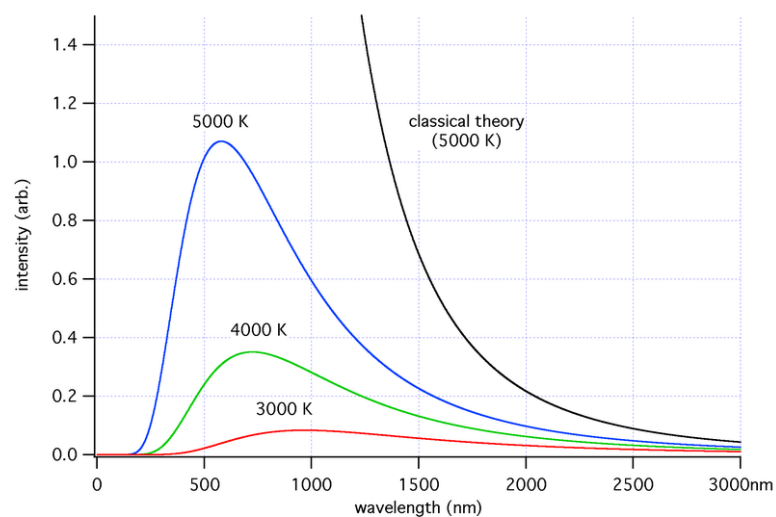
Near Field is in here.  
This is where the  
FRET takes place



Photons are out  
here. This is where  
the fluorescence  
takes place.

# Тепловое излучение: ультрафиолетовая катастрофа

О законах Вина, Релея-Джинса, гипотеза о квантах света



Окончательный вид формулы Планка

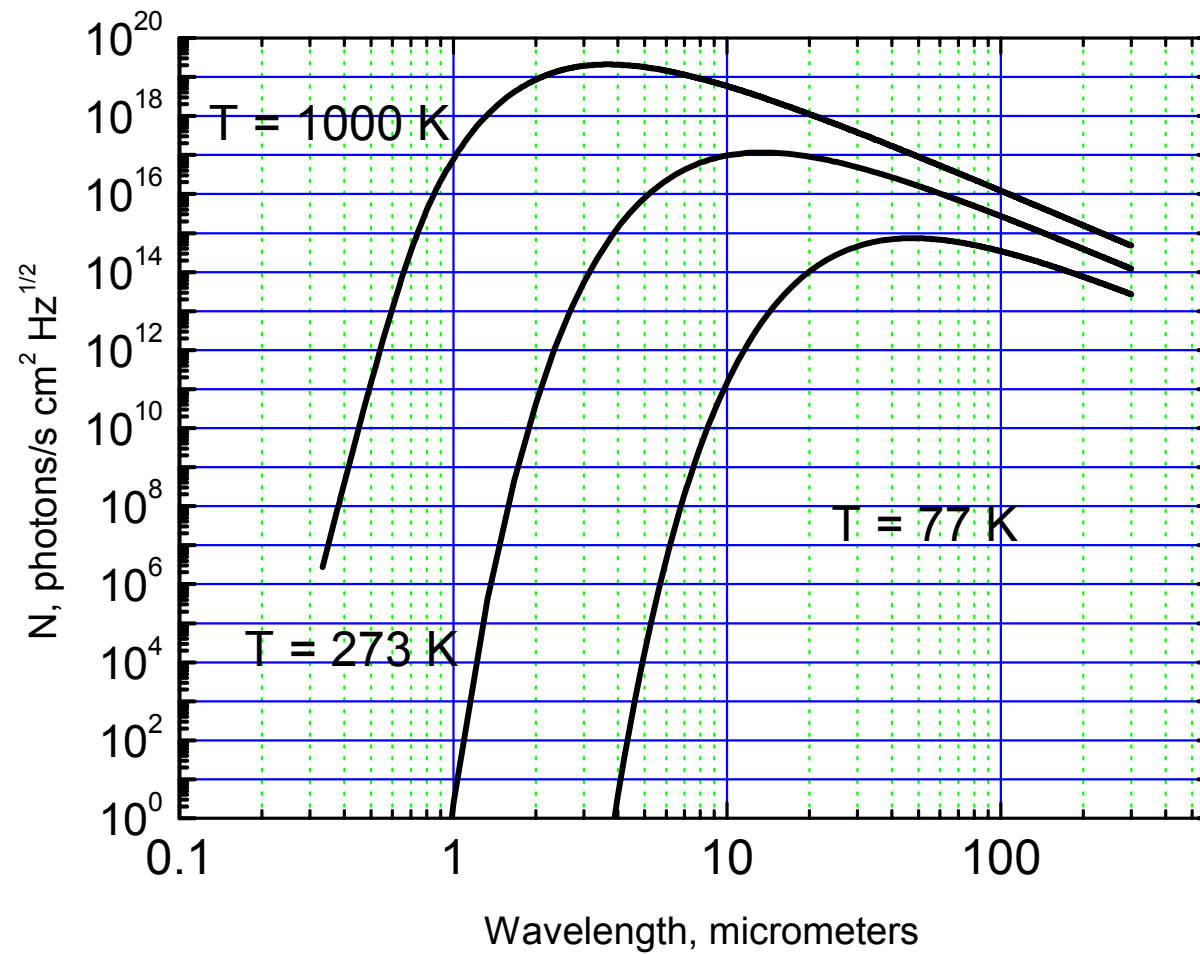
$$r_{\nu, T} = \frac{2\pi\nu^2}{c^2} \frac{h\nu}{e^{h\nu/kT} - 1}$$

Ультрафиолетовая катастрофа





# Тепловое излучение: формула Планка

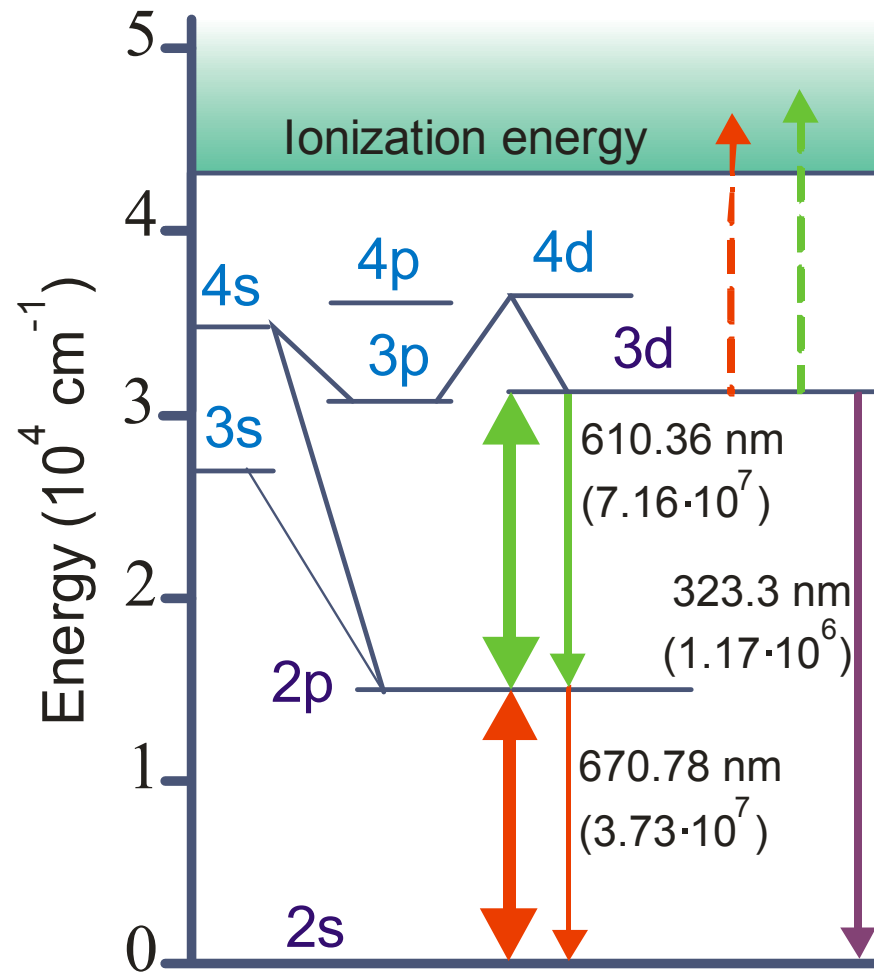


# Источники излучения

- Тепловые источники
- Газоразрядные источники
- Источники на основе электронных пучков

# Излучение атомов и молекул

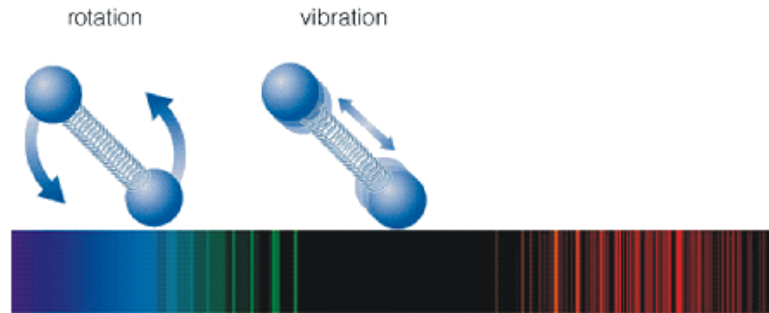
Диаграмма Гротриана для атома лития (слева) и спектр молекулярного водорода в сравнении со спектром атома водорода (справа)



## Molecules

Like atoms and ions, molecules also emit or absorb light at specific wavelengths, corresponding to different rotational and vibrational states.

The energy jumps in molecules are usually smaller than those in atoms and therefore produce lower-energy photons. Thus, most molecular bands lie in the infrared rather than in the visible or ultraviolet.

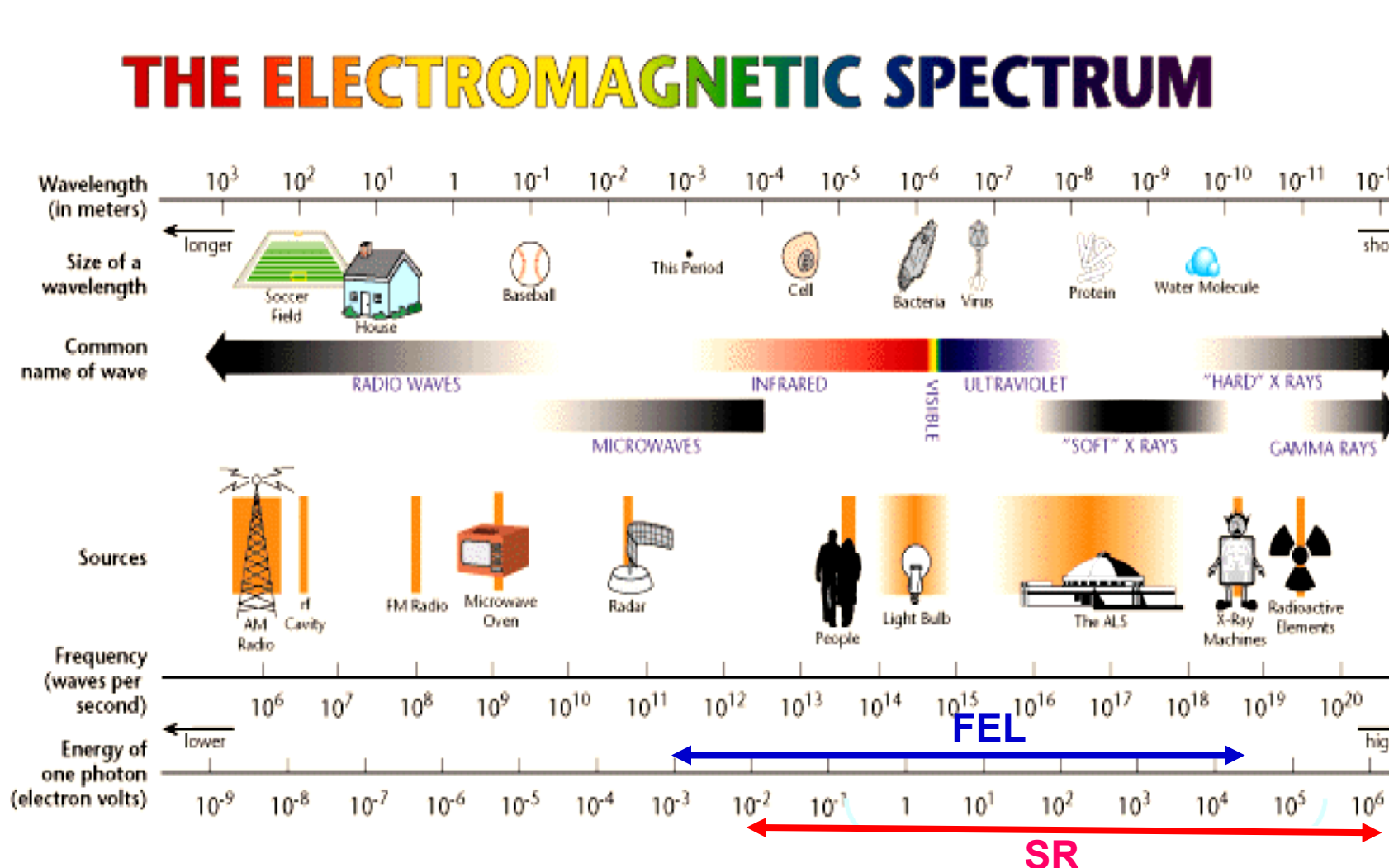


This spectrum of molecular hydrogen ( $\text{H}_2$ ) shows that molecular spectra consist of lines bunched into broad molecular bands.



Spectrum of Molecular Hydrogen

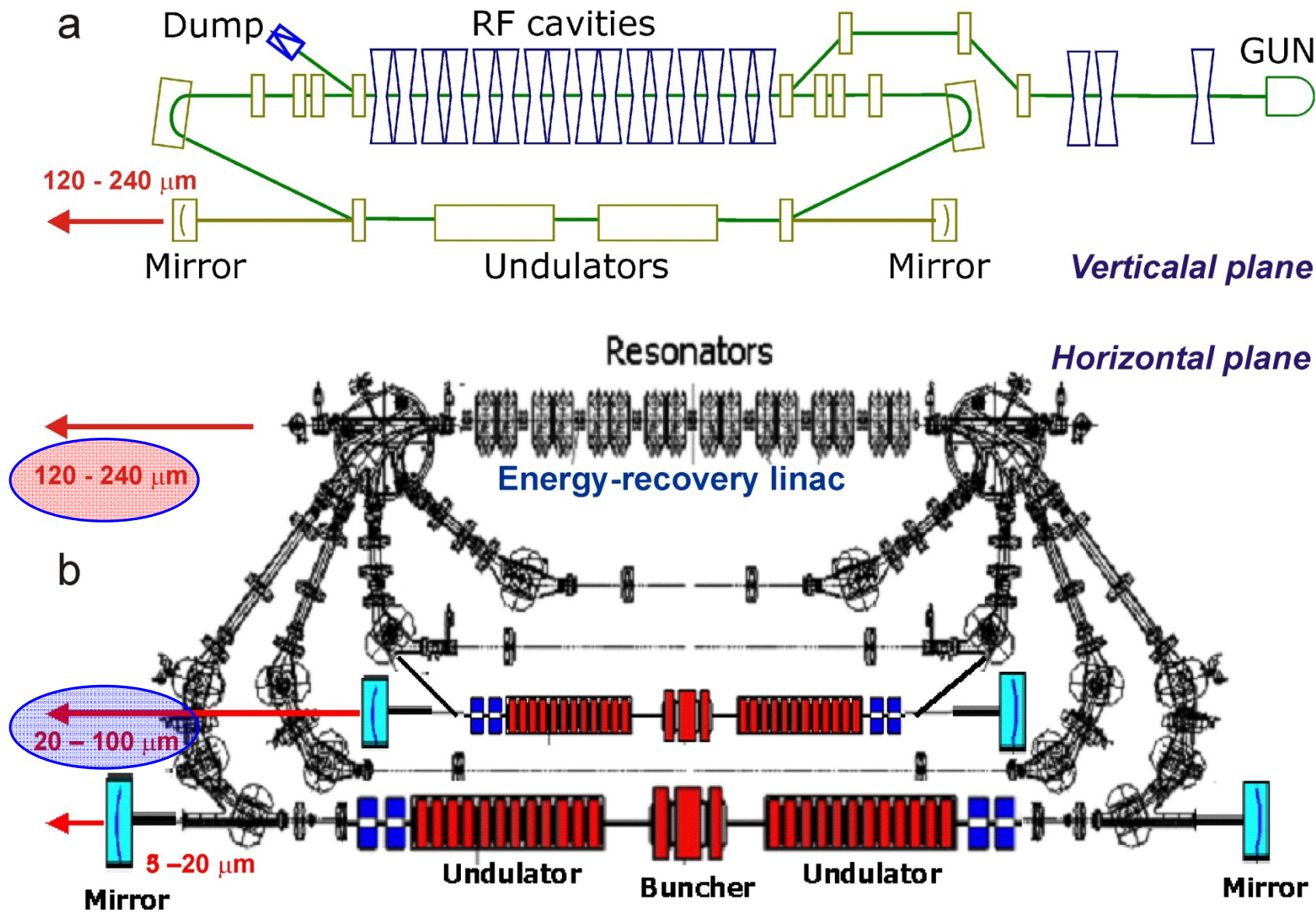
# Диапазоны спектра, перекрываемые источниками синхротронного излучения и лазерами на свободных электронах



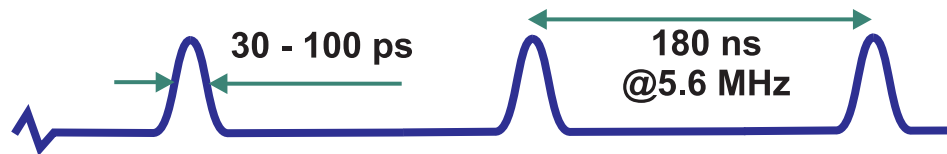
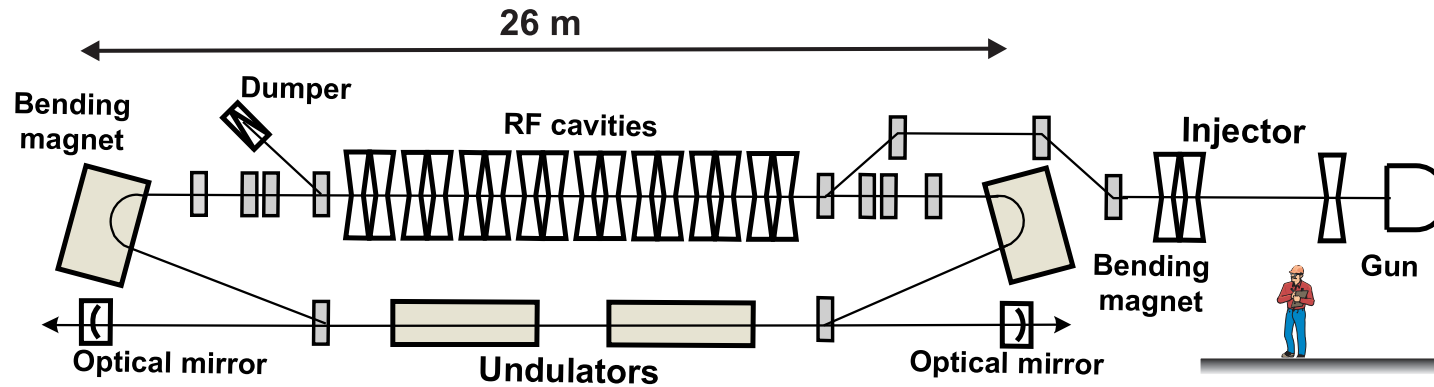
# Лазер на свободных электронах

- Характеристики лазера
- Рабочие станции

# Новосибирский лазер на свободных электронах



# Новосибирский лазер на свободных электронах



Continuous stream of pulses  
with average power 200 W

## Laser beam characteristics:

- Monochromatic radiation tunable within 20 – 240  $\mu\text{m}$
- Relative linewidth: (0.3 – 1)%
- Beam divergence:  $4 \cdot 10^{-3}$  rad
- Complete spatial coherence
- Linear polarization degree: not less than 99.6%

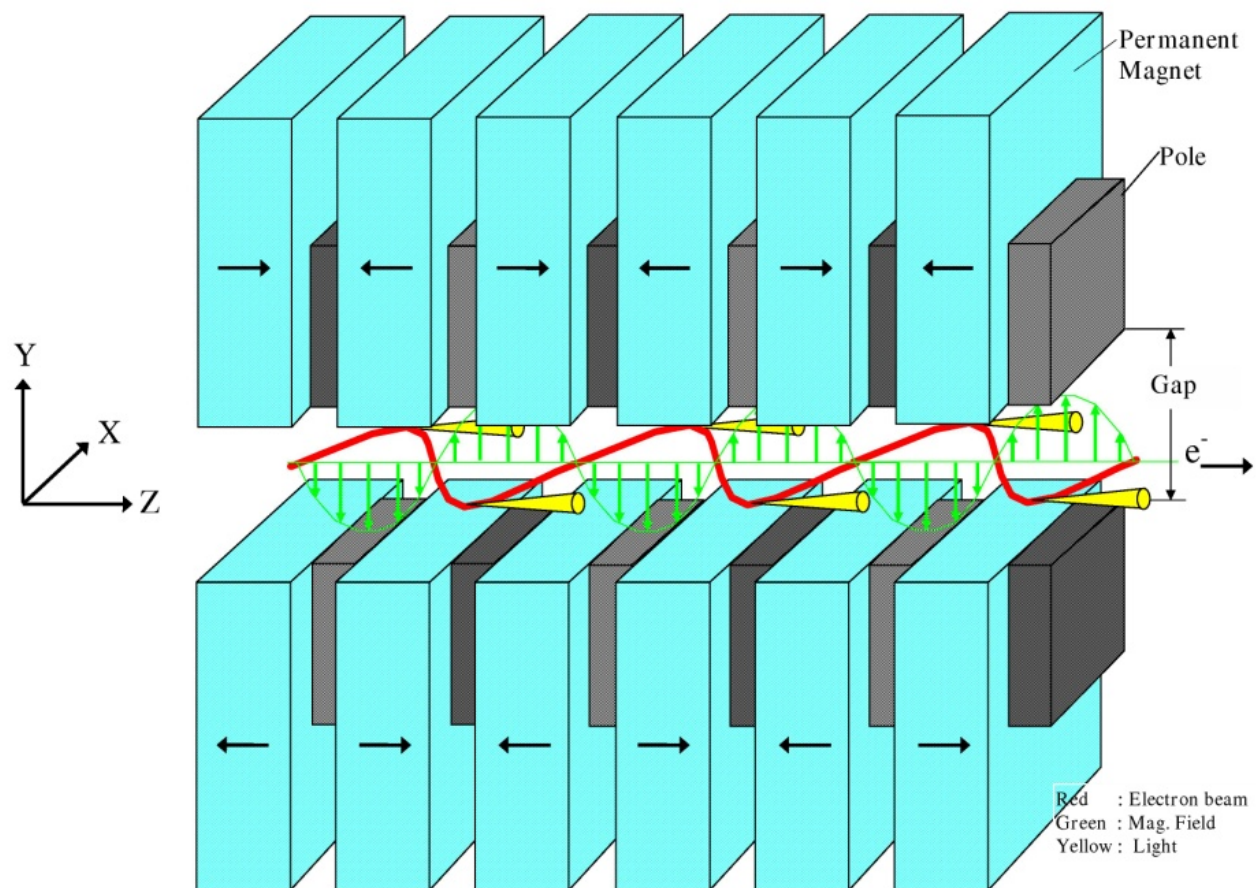
**Free electron lasers (FEL)** – devices which convert the energy of relativistic electrons to the energy of electromagnetic radiation.

**FEL** provide monochromatic radiation at any wavelength (0.1 nm – 1 mm) and continuously tune this wavelength. Average power of radiation may be up to 100 kW.

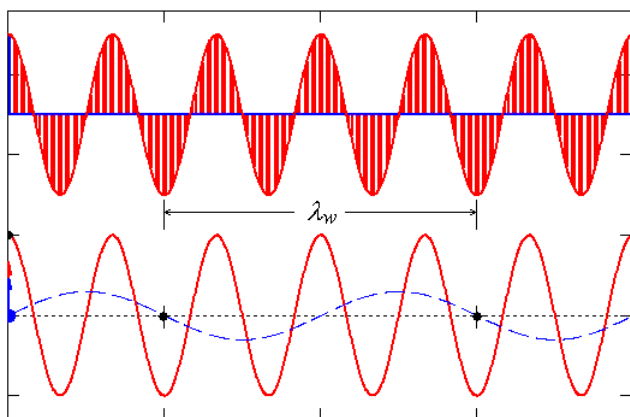
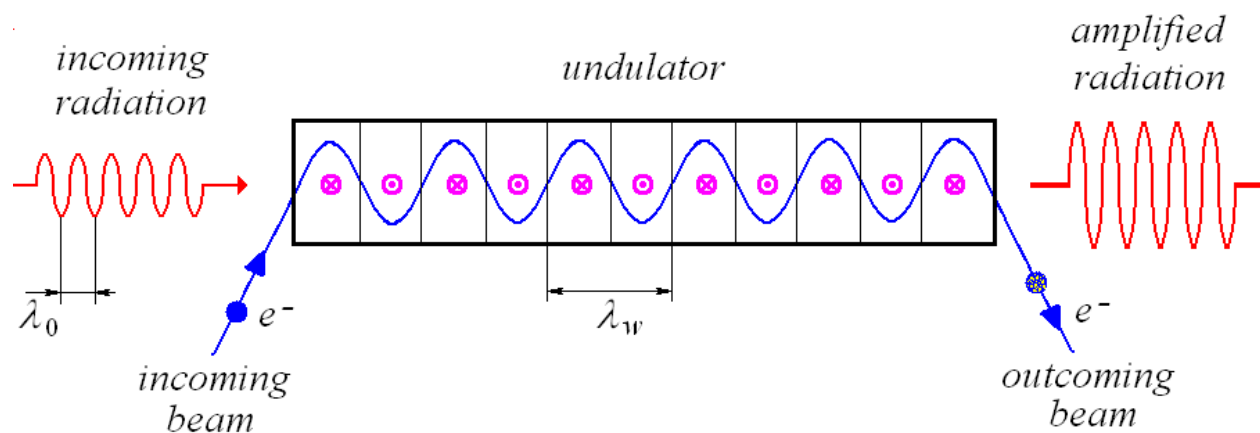
**FEL** use the phenomenon of *stimulated undulator radiation*.



# Траектория электронов в планарном ондуляторе



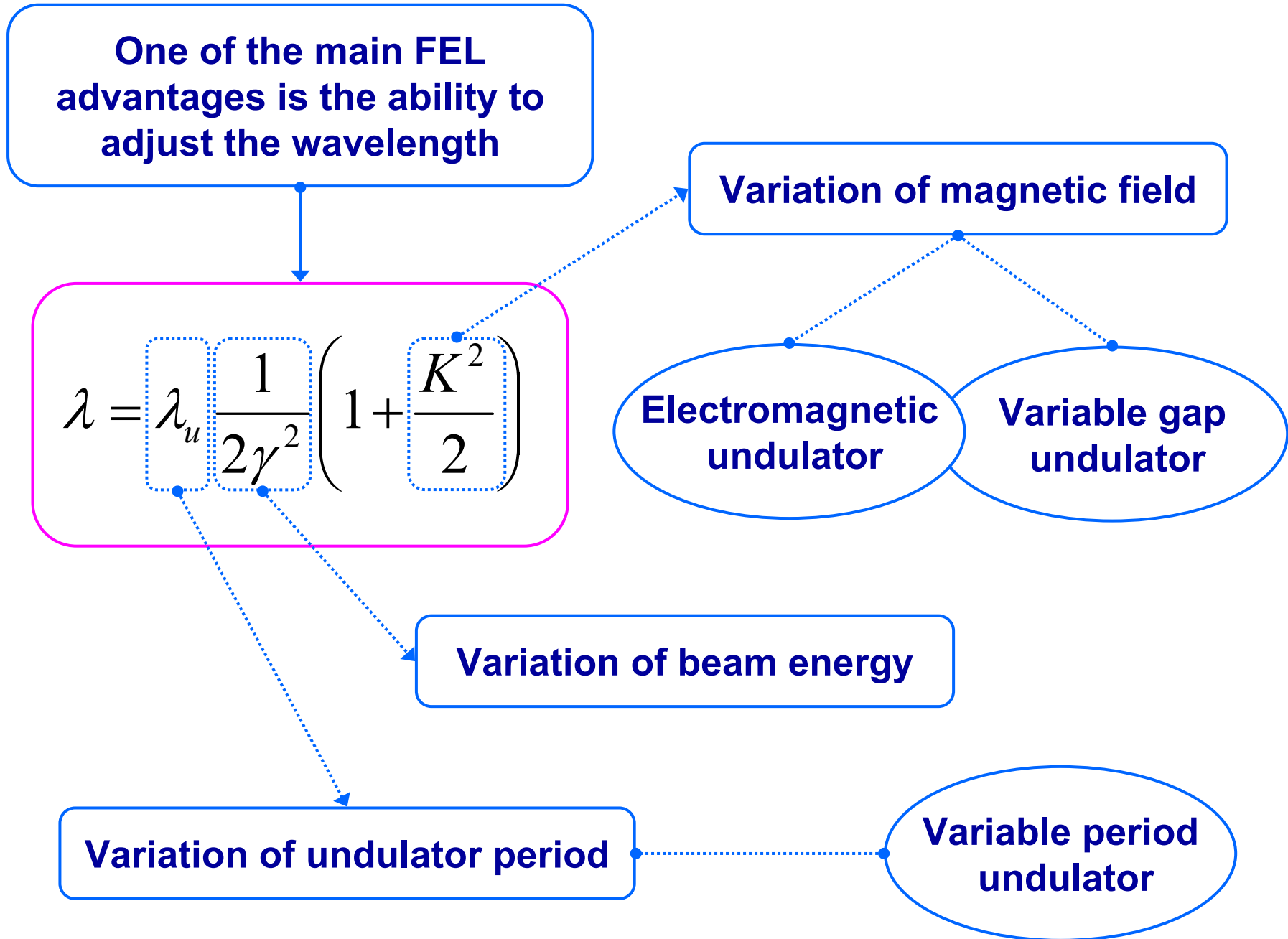
# Принцип работы ЛСЭ



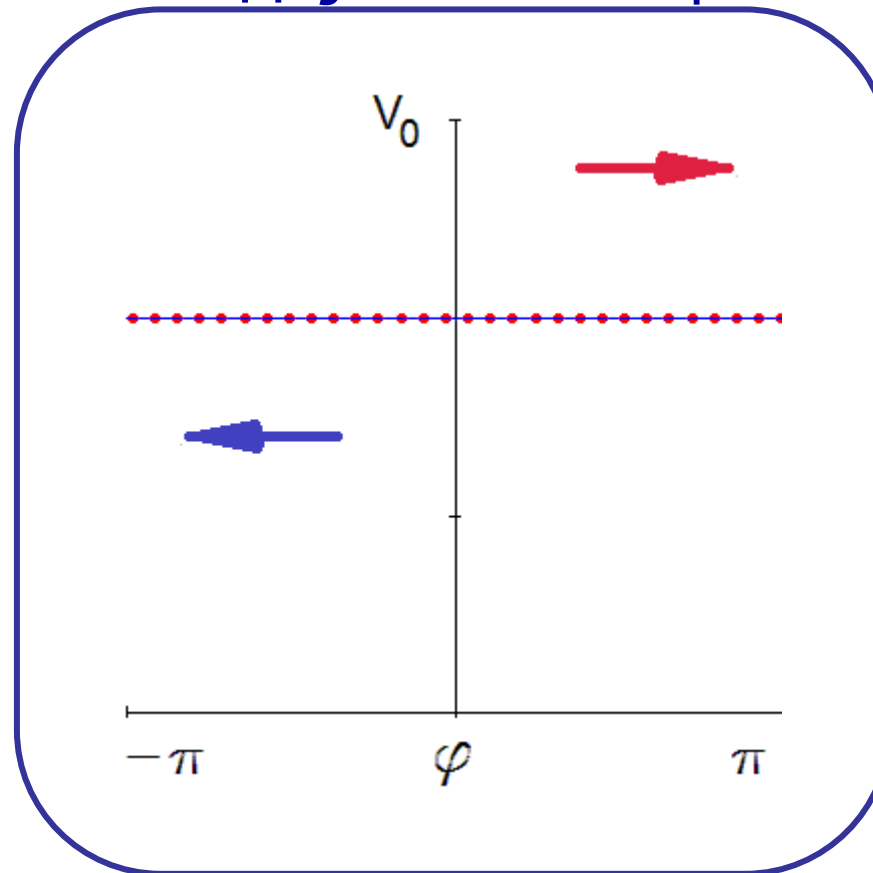
$$\lambda_0 \approx \frac{\lambda_w}{2\gamma^2} \left( 1 + \frac{K^2}{2} \right)$$

**synchronism condition**  
which is necessary for the  
**energy transfer**

$$\left\langle \frac{d\gamma}{dz} \right\rangle = \frac{e}{mc^3} \langle \mathcal{E}_x V_x \rangle$$

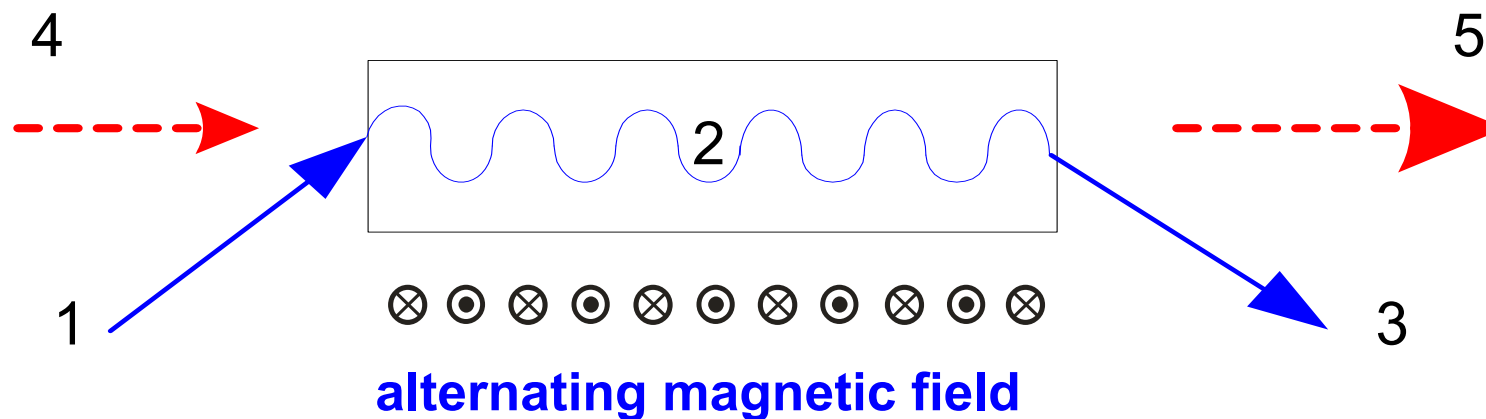


# Группировка электронов в ондуляторе



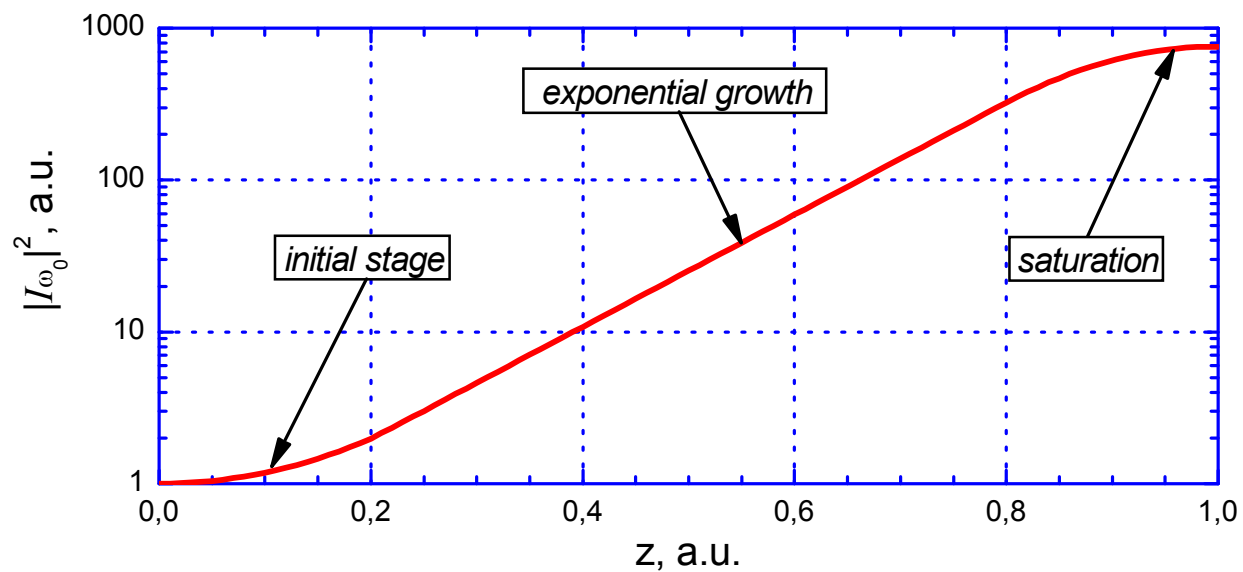
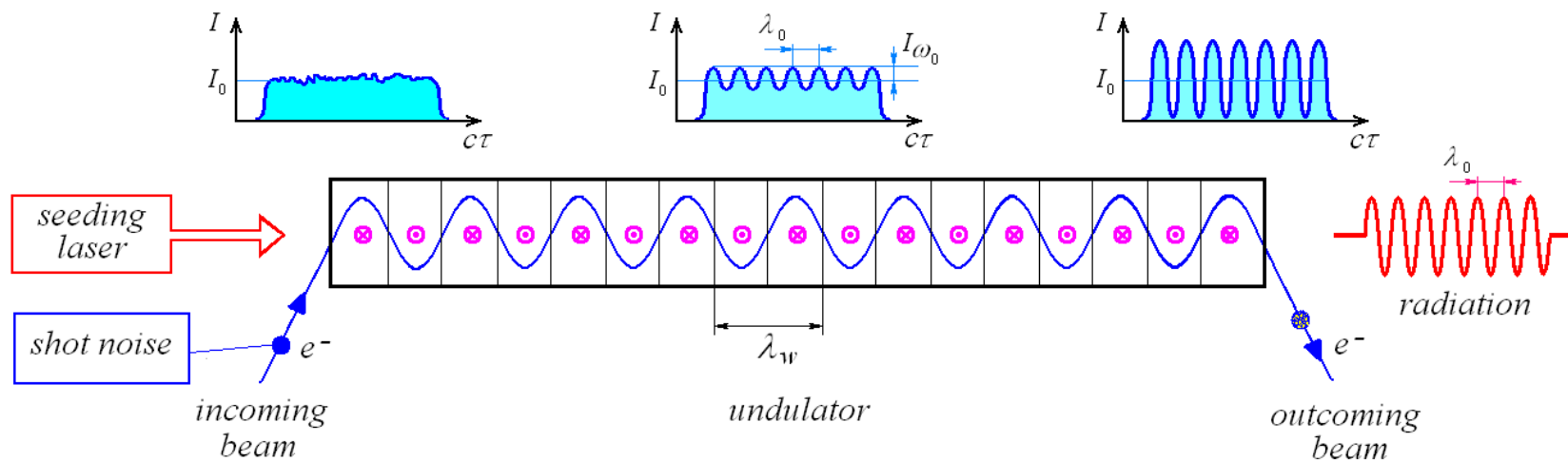
Energy modulation leads to the modulation of  
the current density

# Упрощенная схема ЛСЭ

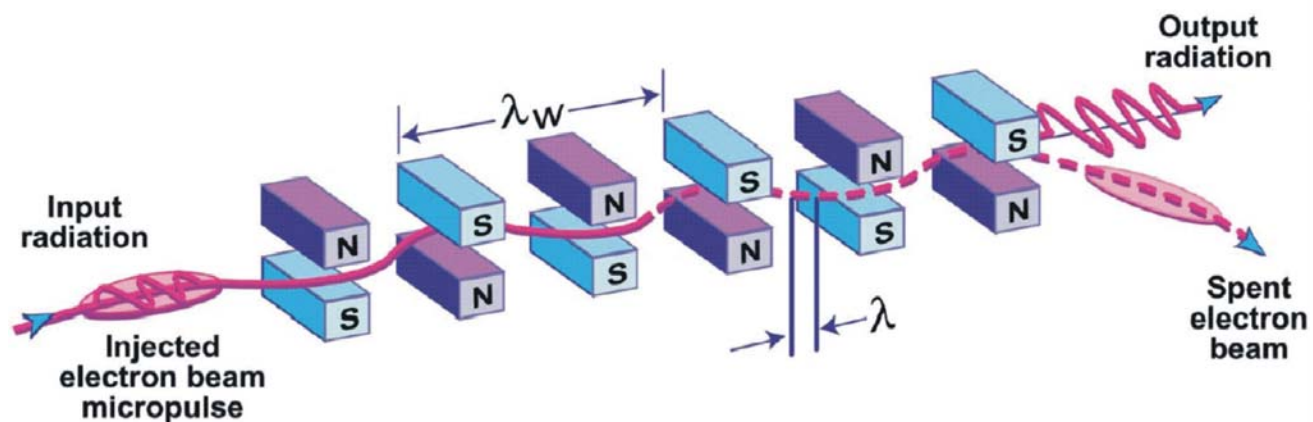
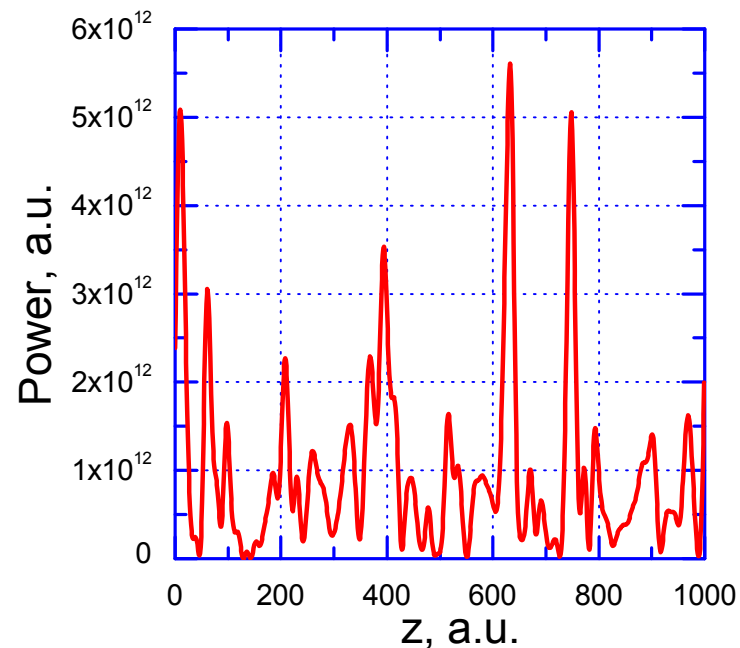
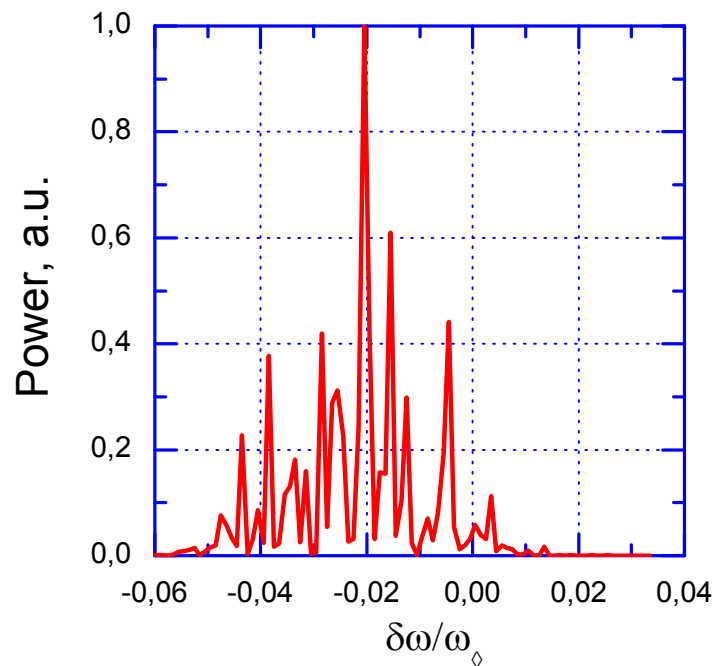


- 1 – input electron beam
- 2 – undulator
- 3 – used electron beam
- 4 – input radiation
- 5 – amplified radiation

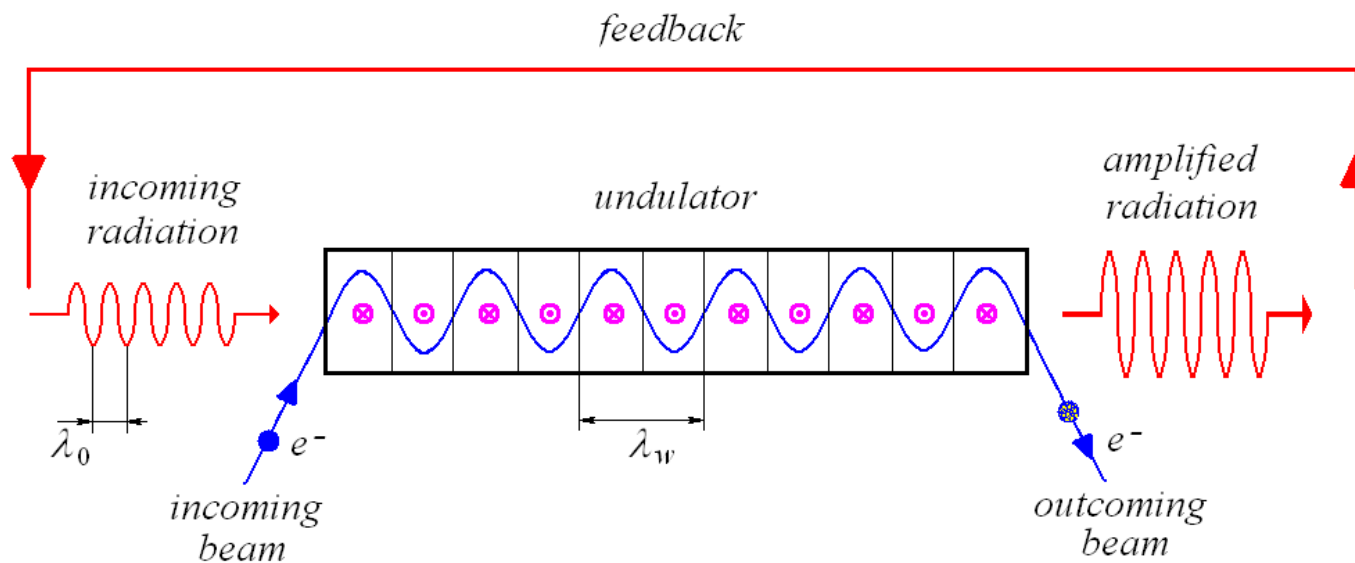
# Схема однопроходного ЛСЭ-усилителя



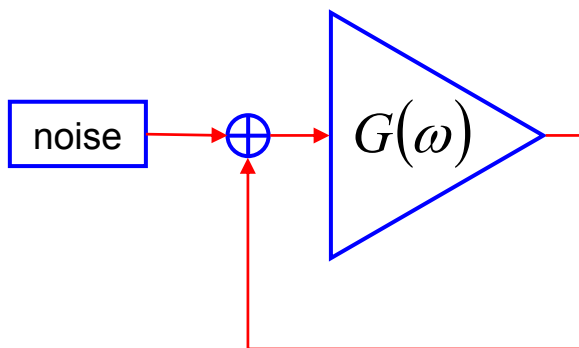
# Спектр излучение и распределение пиковой мощности в случае SASE



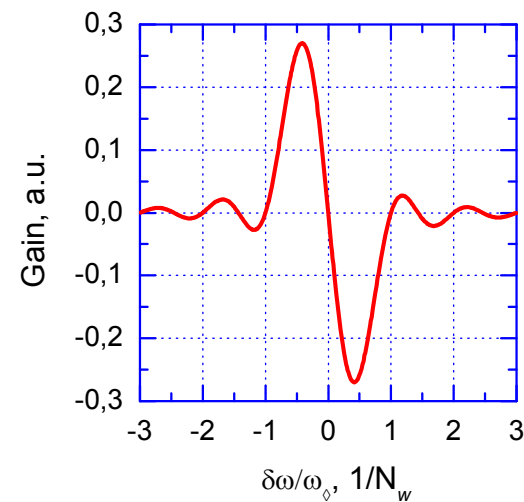
# Схема ЛСЭ генератора



## Equivalent scheme

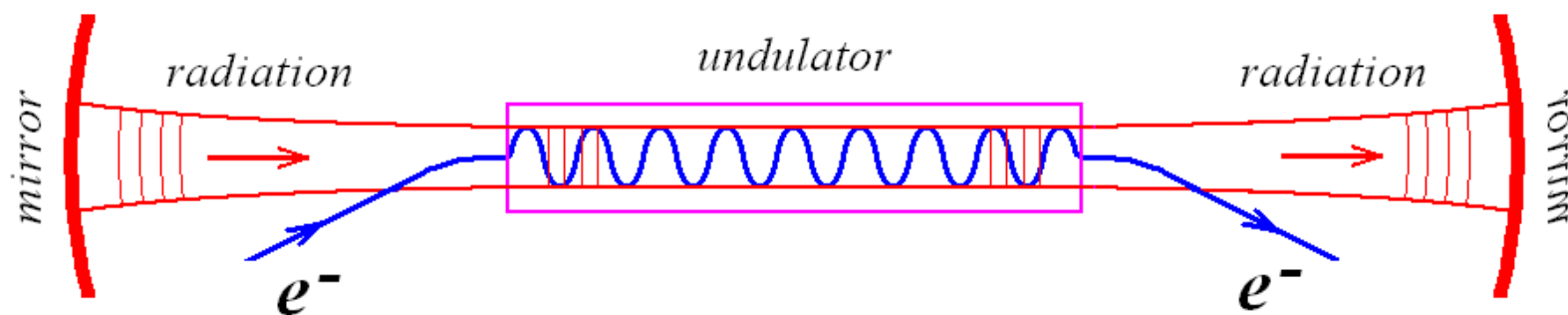


Narrow bandwidth amplifier with feedback

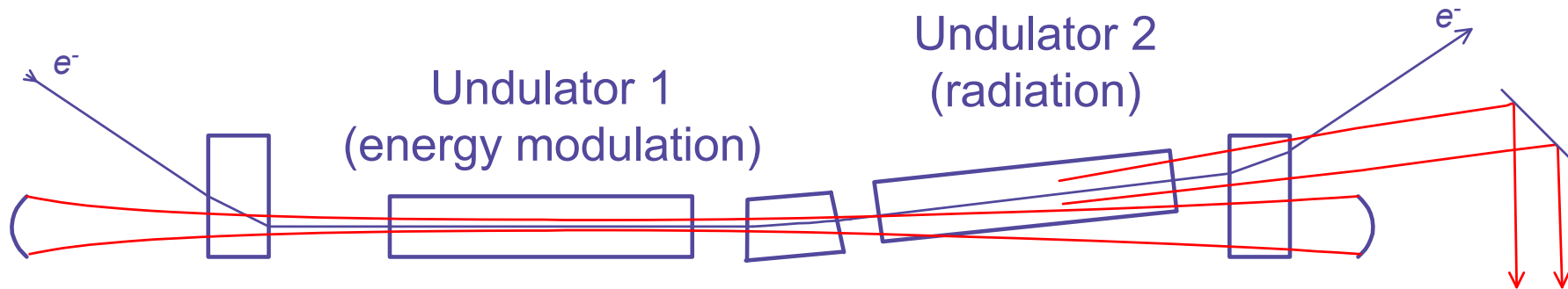




# ЛСЭ генератор с оптическим резонатором



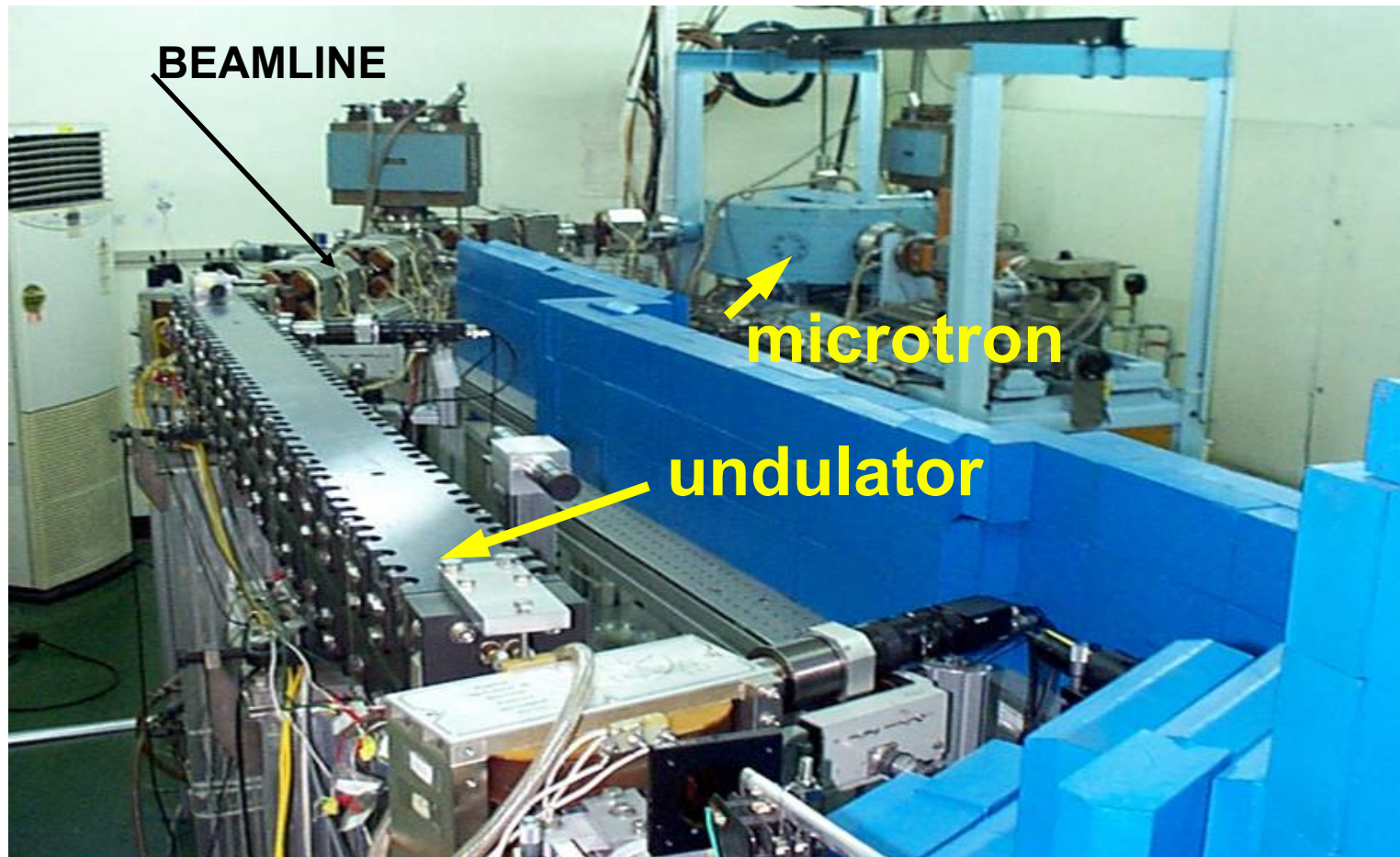
## Схема вывода электронов



Why electron outcoupling?

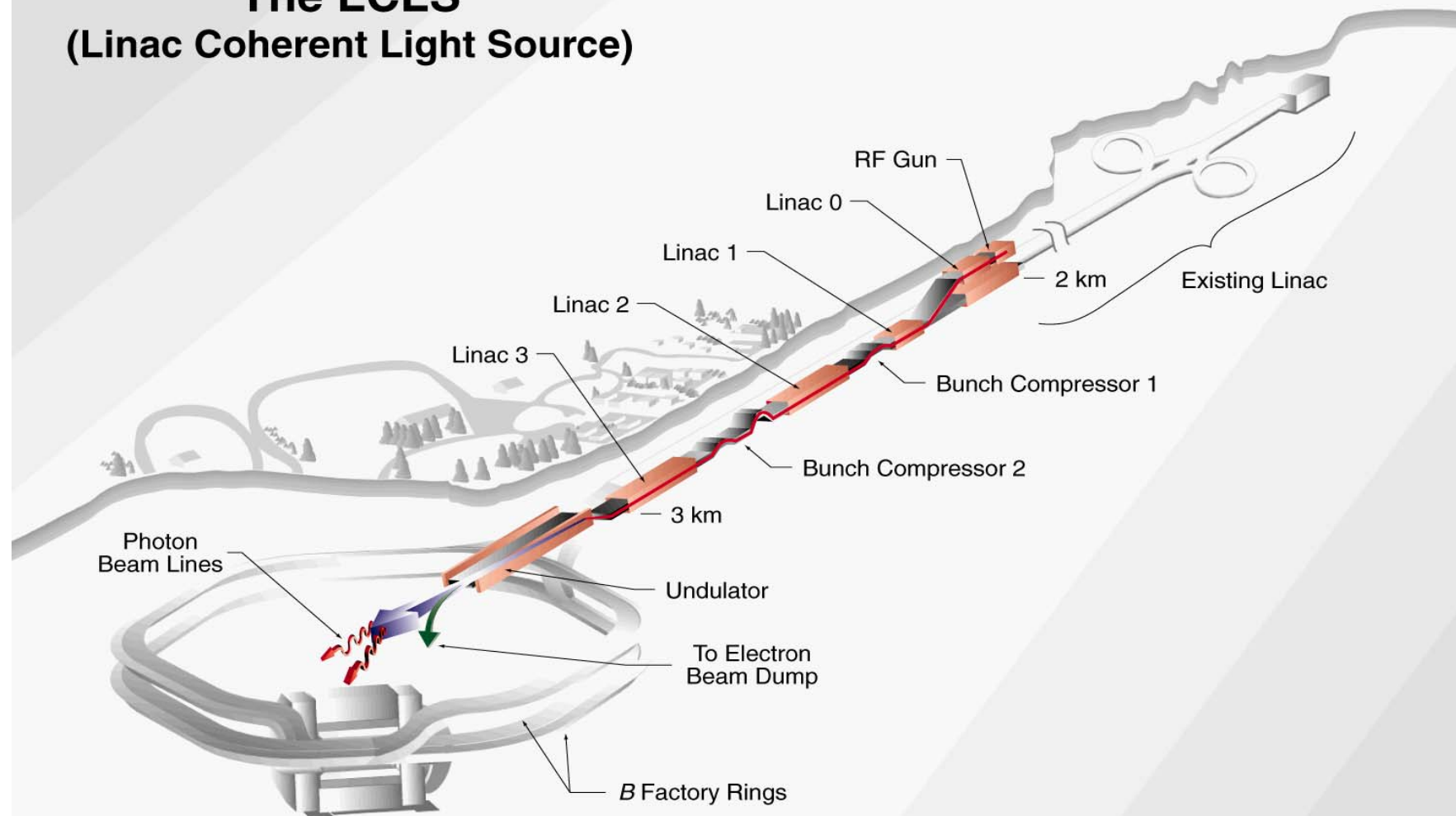
- lower load on optical cavity mirrors
- wavelength tunability (high power partially transparent mirrors have narrow band)

Компактный ЛСЭ терагерцового диапазона,  
построенный специалистами ИЯФ СО РАН в  
Корейском институте атомной энергии в 1988 году



# Рентгеновский лазер на свободных электронах (SLAC, USA)

## The LCLS (Linac Coherent Light Source)



# Ондулятор рентгеновского ЛСЭ (полная длина - 50 м)

[www.phys.nsu.ru](http://www.phys.nsu.ru)



## Характеристики некоторых ЛСЭ терагерцового диапазона

	Stanford	UCSB		FELIX	ENEA Compact FEL
$\lambda$ ( $\mu\text{m}$ )	15-80	63-340	340-2500	3-250	2000 - 3500
$\nu$ (THz)	3.75-20	0.88-4.8	0.12-0.88	1.2-100	0.09 – 0.15
<b>Micropulse width</b>	2-10 ps	-	-	6-100 cycles	50 ps
<b>Micropulse Rep Rate</b>	11.8 MHz	-	-	1000 MHz, 50 MHz, 25 MHz	3 GHz
<b>Micropulse Energy</b>	1 $\mu\text{J}$	-	-	1-50 $\mu\text{J}$	0.5 $\mu\text{J}$
<b>Macropulse Width</b>	0.5-5 ms	1-20 $\mu\text{s}$	1-6 $\mu\text{s}$	5 ms	4 $\mu\text{s}$
<b>Macropulse Rep Rate</b>	0-20 Hz	0-7.5 Hz	0-1.5 Hz	10 Hz	1 -10 Hz
<b>Average Power</b>	< 1 W	5-100 mW	5-100 mW	< 1 W	4 – 40 mW
<b>Peak Power</b>	< 500 kW	< 6 kW	< 15 kW	< 10 MW (@ 20 $\mu\text{m}$ ); < 1 MW (@ 100 $\mu\text{m}$ )	10 kW (@ 2600 $\mu\text{m}$ )
<b>Peak Field</b>	< 250 kV/cm	< 70 kV/cm	< 20 kV/cm	< 10 MV/cm (@ 20 $\mu\text{m}$ ); < 2 MV/cm (@ 100 $\mu\text{m}$ )	3.5 kV/cm (@ 2600 $\mu\text{m}$ )

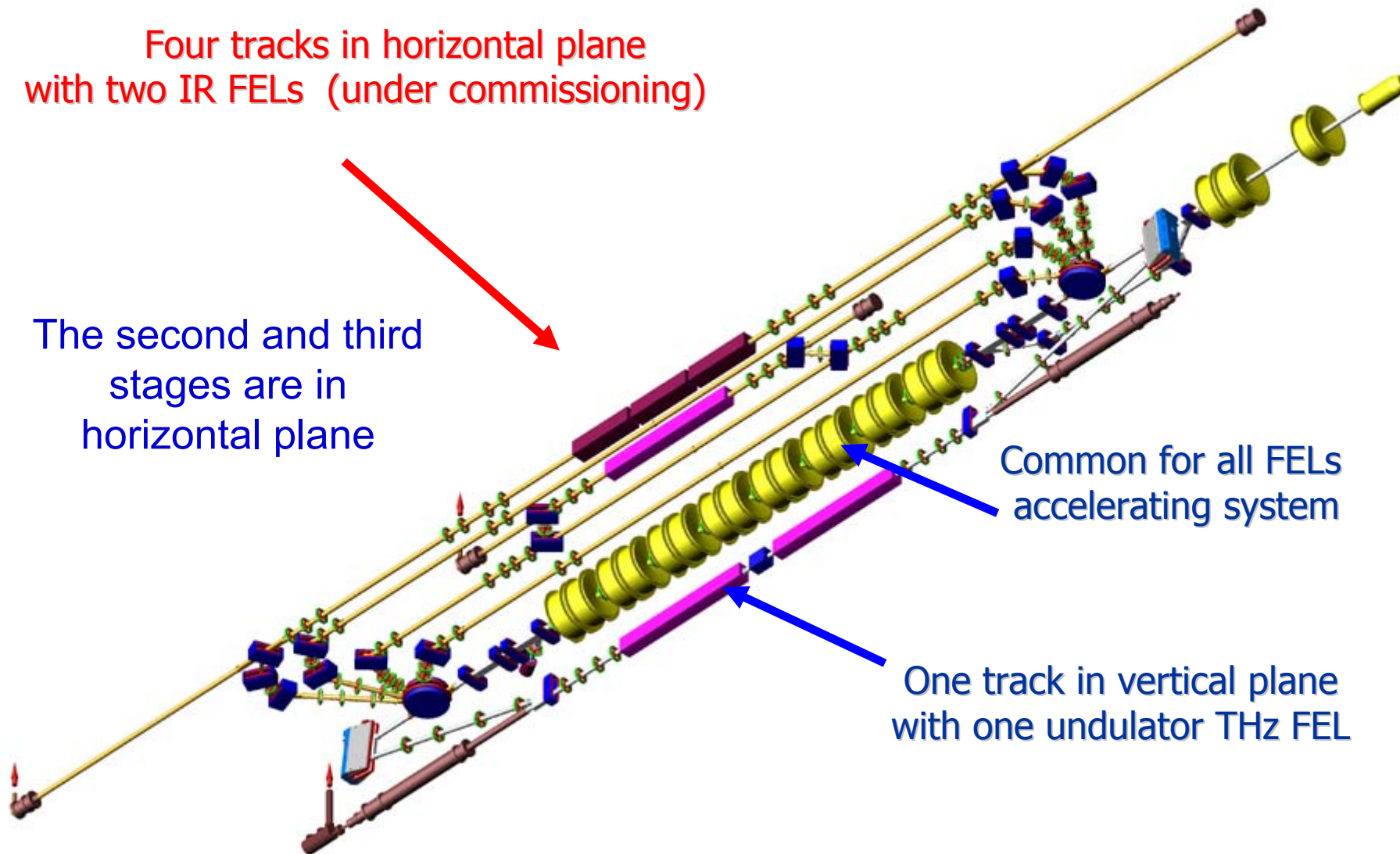
# Новосибирский лазер на свободных электронах

Four tracks in horizontal plane  
with two IR FELs (under commissioning)

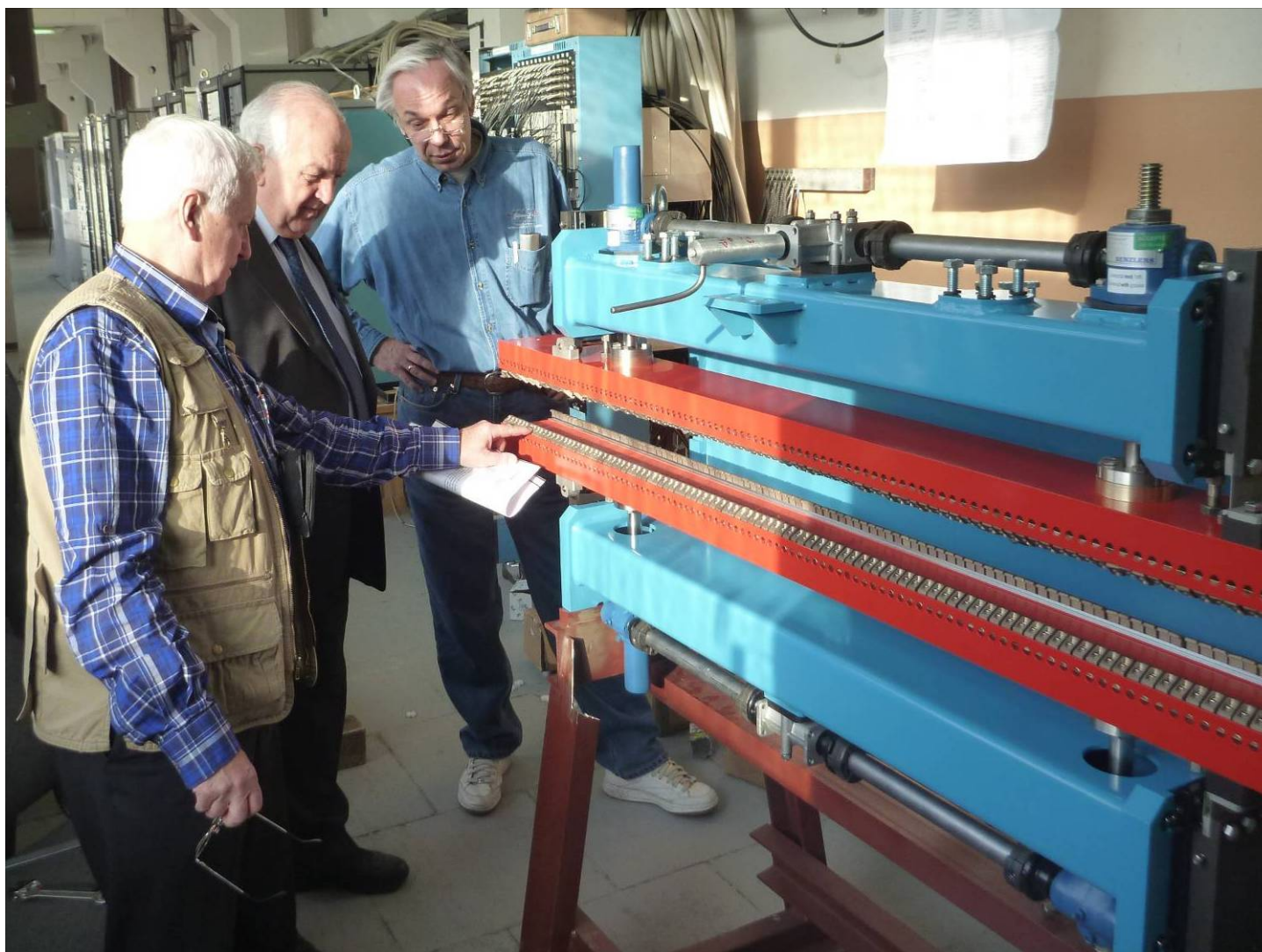
The second and third  
stages are in  
horizontal plane

Common for all FELs  
accelerating system

One track in vertical plane  
with one undulator THz FEL

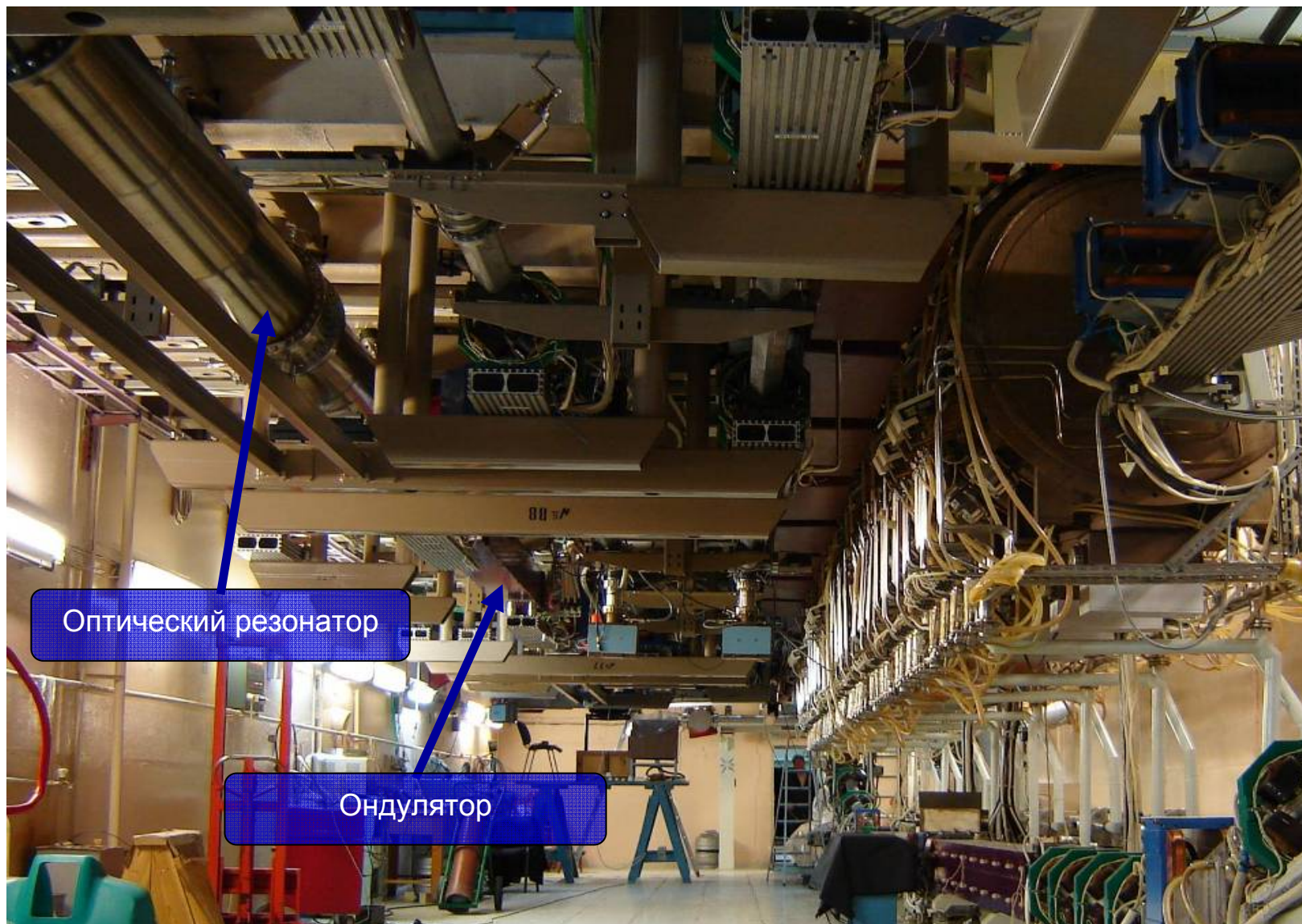


## Так выглядит один из вариантов ондулятора

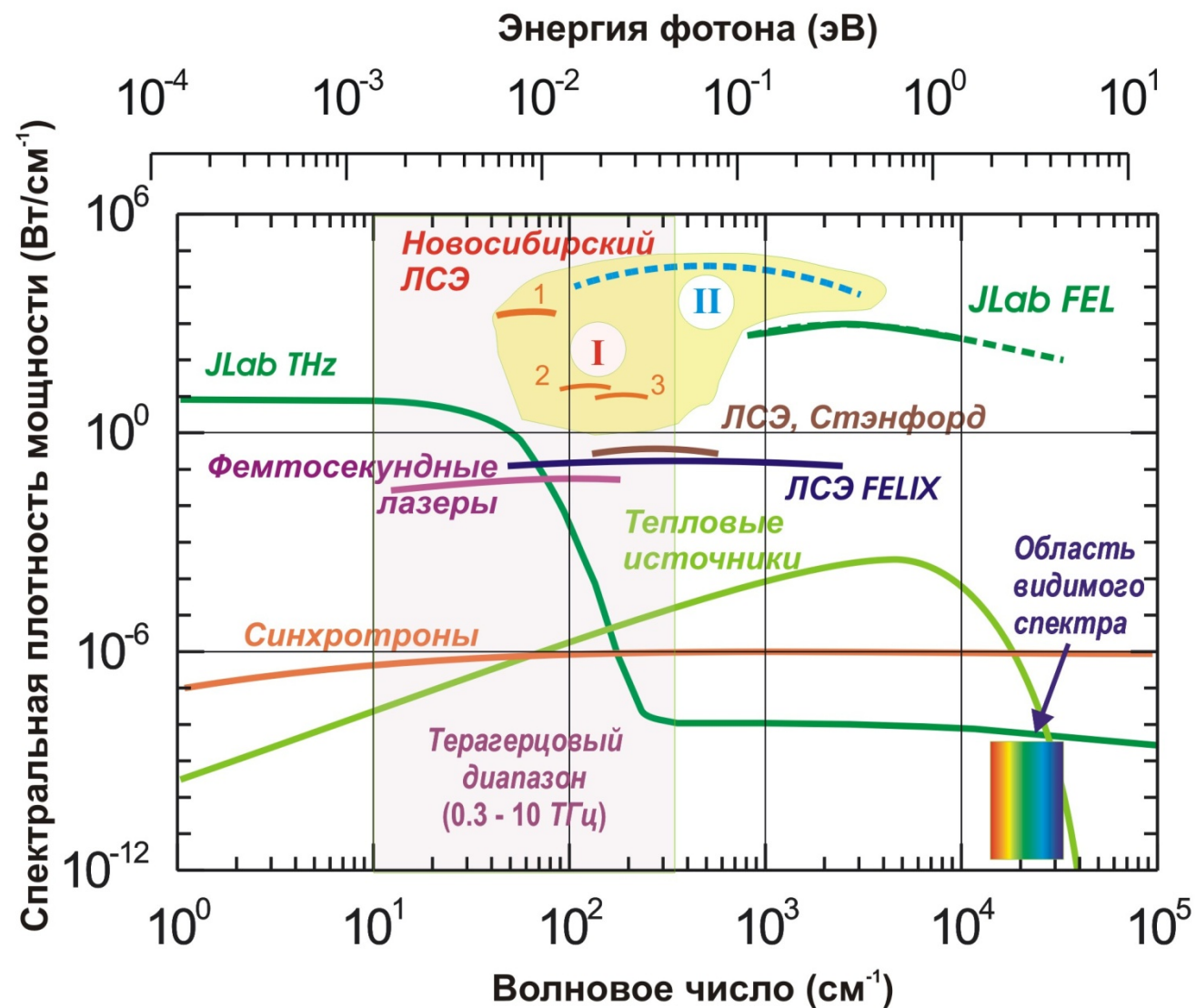




# Новосибирский лазер на свободных электронах



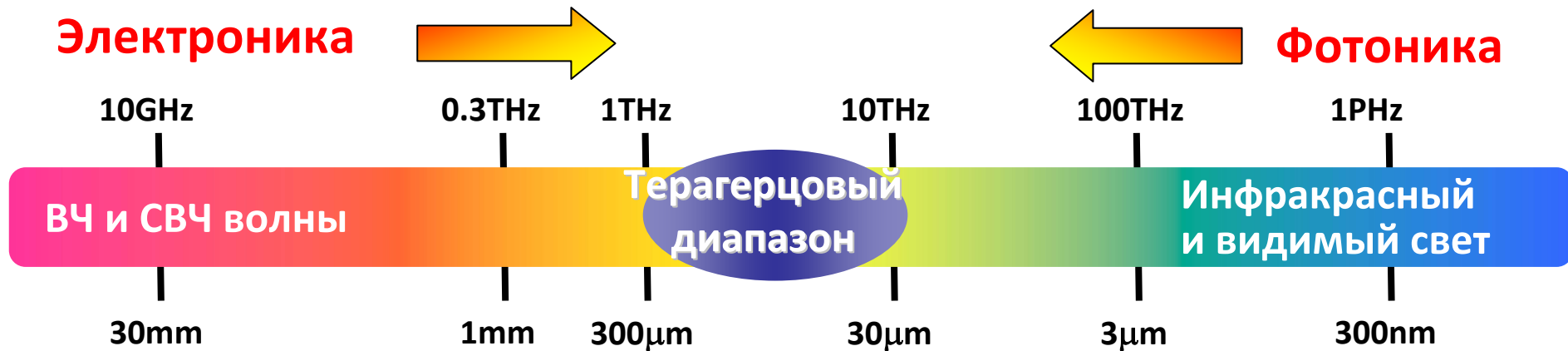
# Сравнение Новосибирского ЛСЭ с другими источниками



# Терагерцовое излучение



# Где лежит терагерцовый диапазон?



- В этом диапазоне лежат: вращательные частоты простых молекул; частоты собственных колебаний и энергии конформационных переходов многих сложных молекул, включая биологически важные; энергия водородных связей; частоты фононов, переходы с участием мелких примесей в полупроводниках...etc.
- Многие материалы, непрозрачные в видимом диапазоне и “абсолютно прозрачные” для рентгеновского излучения, частично прозрачны в терагерцовом диапазоне.
- Частичное проникновение сквозь одежду, бумагу, дерево, пластмассу, керамику и другие материалы открывает широкие возможности для интравидения

# Пропускание атмосферы в ТГц диапазоне

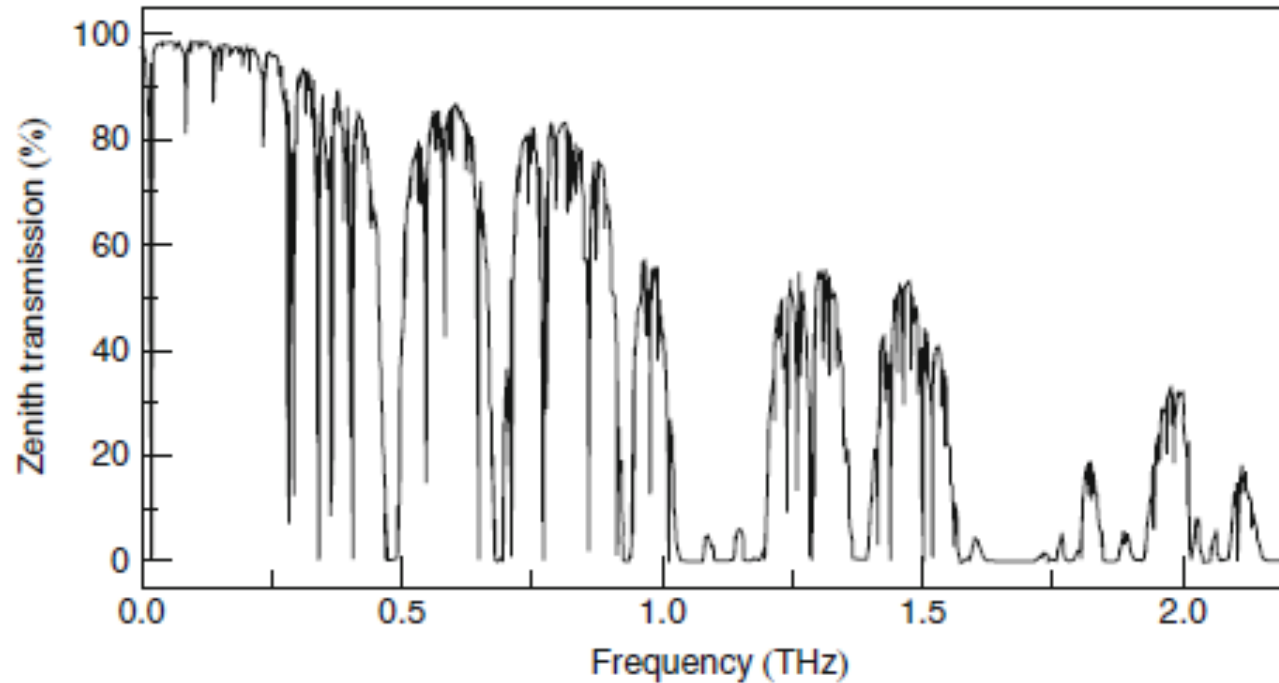


Fig. 1.1 Zenith atmospheric transmission at Cerro Sairecabur on 24 January 2005 (adapted from [5])

Из книги Brundermann и др. Terahertz Techniques, Springer, 2012.

# Пропускание атмосферы в ТГц диапазоне (продолжение)

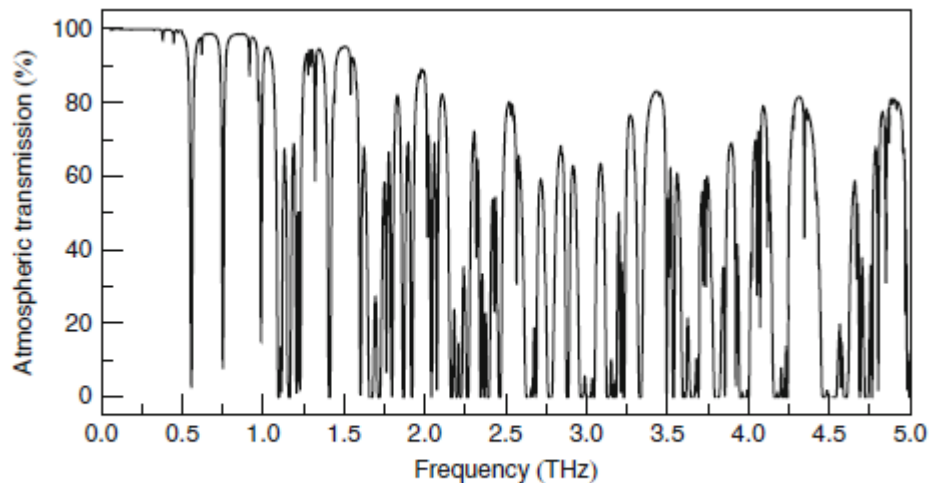
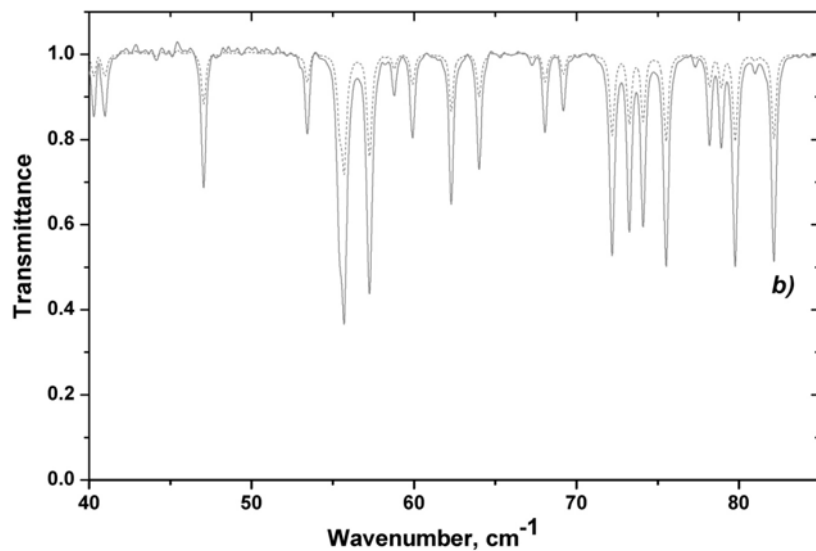


Fig. 1.2 Atmospheric transmission of a 1-m path at 1013 hPa and 40% relative humidity



Пропускание осушенного азота в транспортном канале НЛСЭ на длине 15 метров

# Импульсные источники и детекторы дальнего ИК (терагерцового) диапазона

## Генерация

- Фотопроводящие антенны (хорошая мощность)
- Электро-оптические кристаллы (Оптическое выпрямление)

## Детектирование

- Фотопроводящие дипольные антенны (Большая чувствительность)
- Электро-оптические кристаллы (Большая частотная и амплитудная полоса)

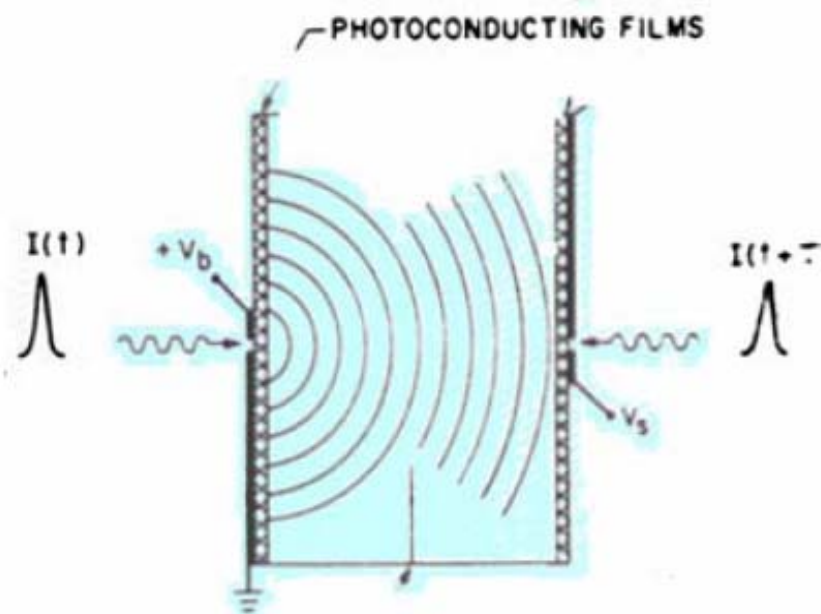
# Пикосекундный фотопроводящий диполь Герца



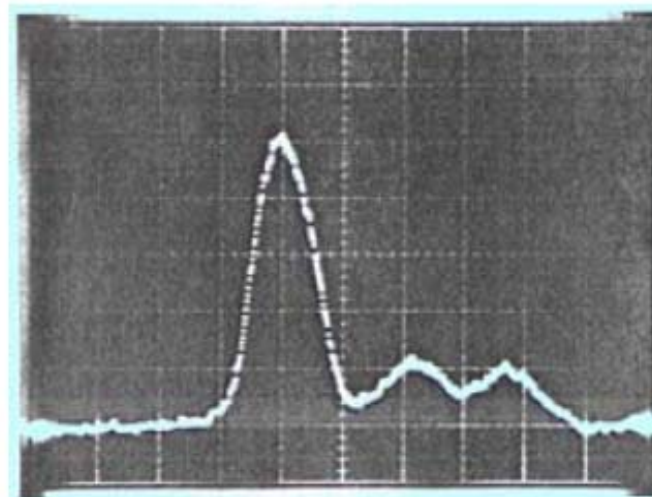
## Picosecond photoconducting Hertzian dipoles

Appl. Phys. Lett. 45 (3), 284 (1984)

D. H. Auston, K.P. Cheung, and P. R. Smith



Experimental configuration.



Measured response.



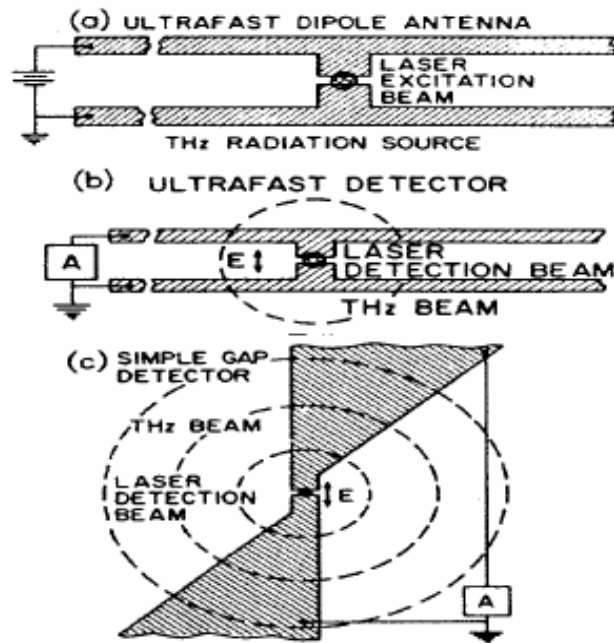
# Генерация и детектирование излучения дипольной антенной

## High-brightness terahertz beams characterized with an ultrafast detector

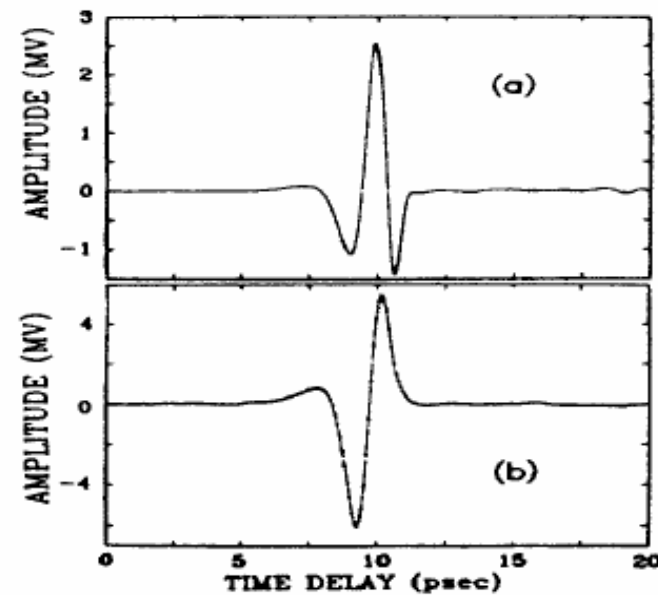


Appl. Phys. Lett., 55 (4), 337 (1989)

Martin van Exter, Ch. Fattinger and D. Grischkowsky



Antenna and detectors used in the experiment.



(a) Measured electrical pulse of THz with detector (b) of Fig.1.  
(b) Measured electrical pulse of THz with antenna (c) of Fig.1.

# Электо-оптическая генерация и детектирование терагерцового излучения

## Electro-optic generation and detection of femtosecond electrical transients

IEEE Journal of Quantum Electronics, 24, 184 (1988)

D. H. Auston and M. C. Nuss

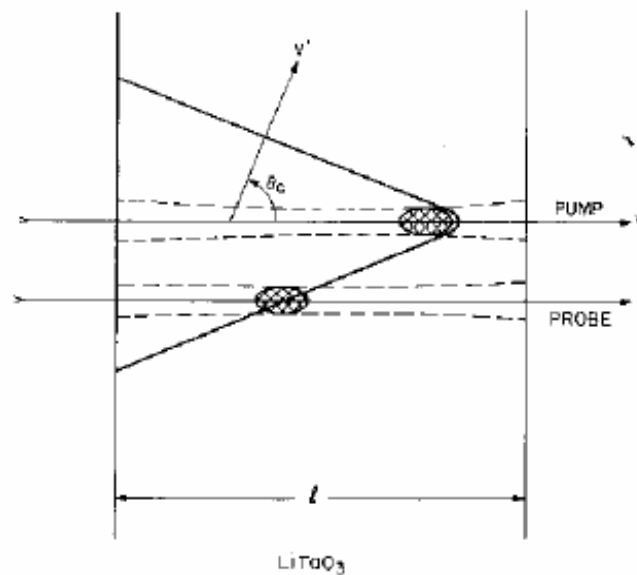


Fig.1 Cherenkov radiation from femtosecond optical pulses in lithium tantalate.

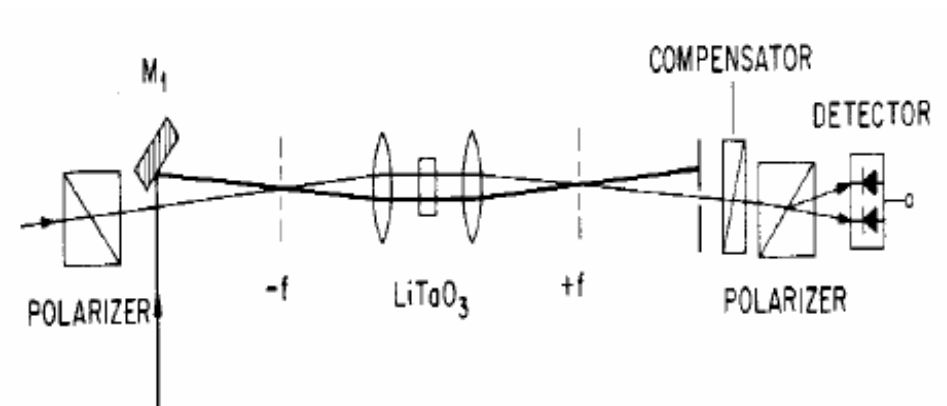
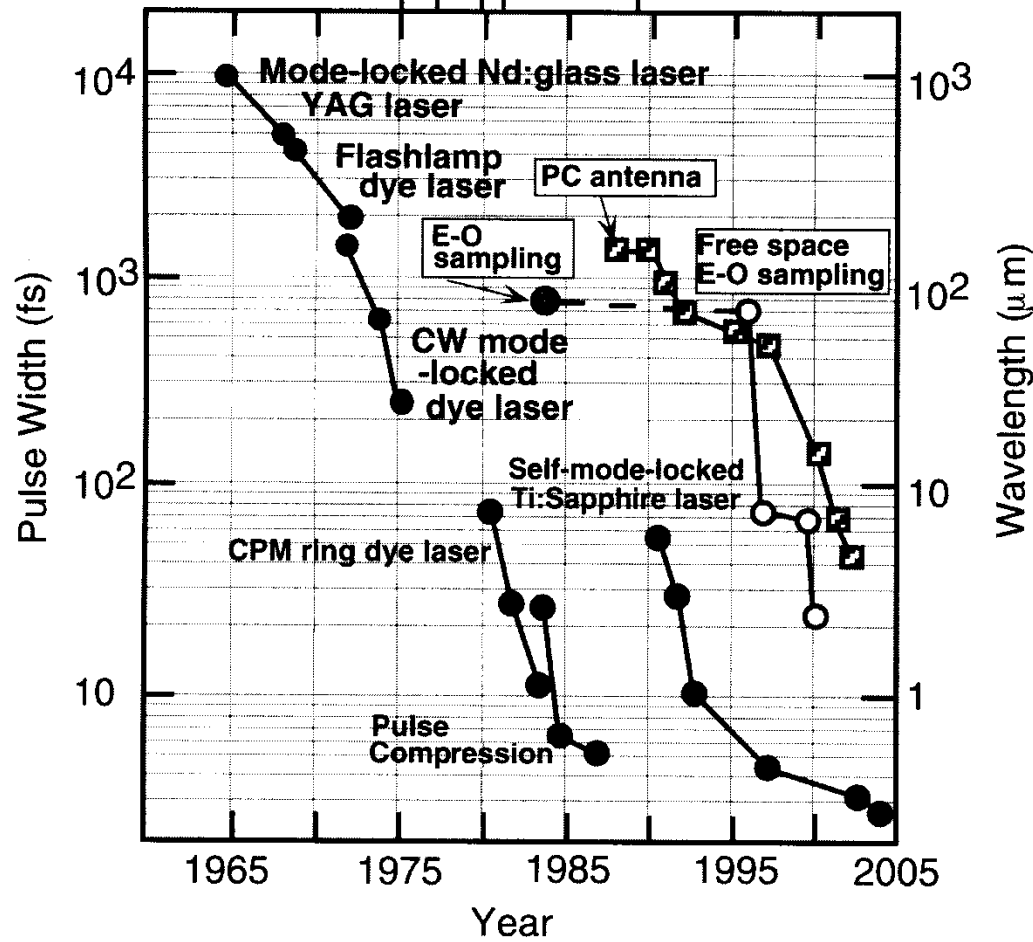


Fig.2 Detection scheme used for measuring the electrical waveforms produced by electro-optic Cherenkov radiation in LiTaO<sub>3</sub>.

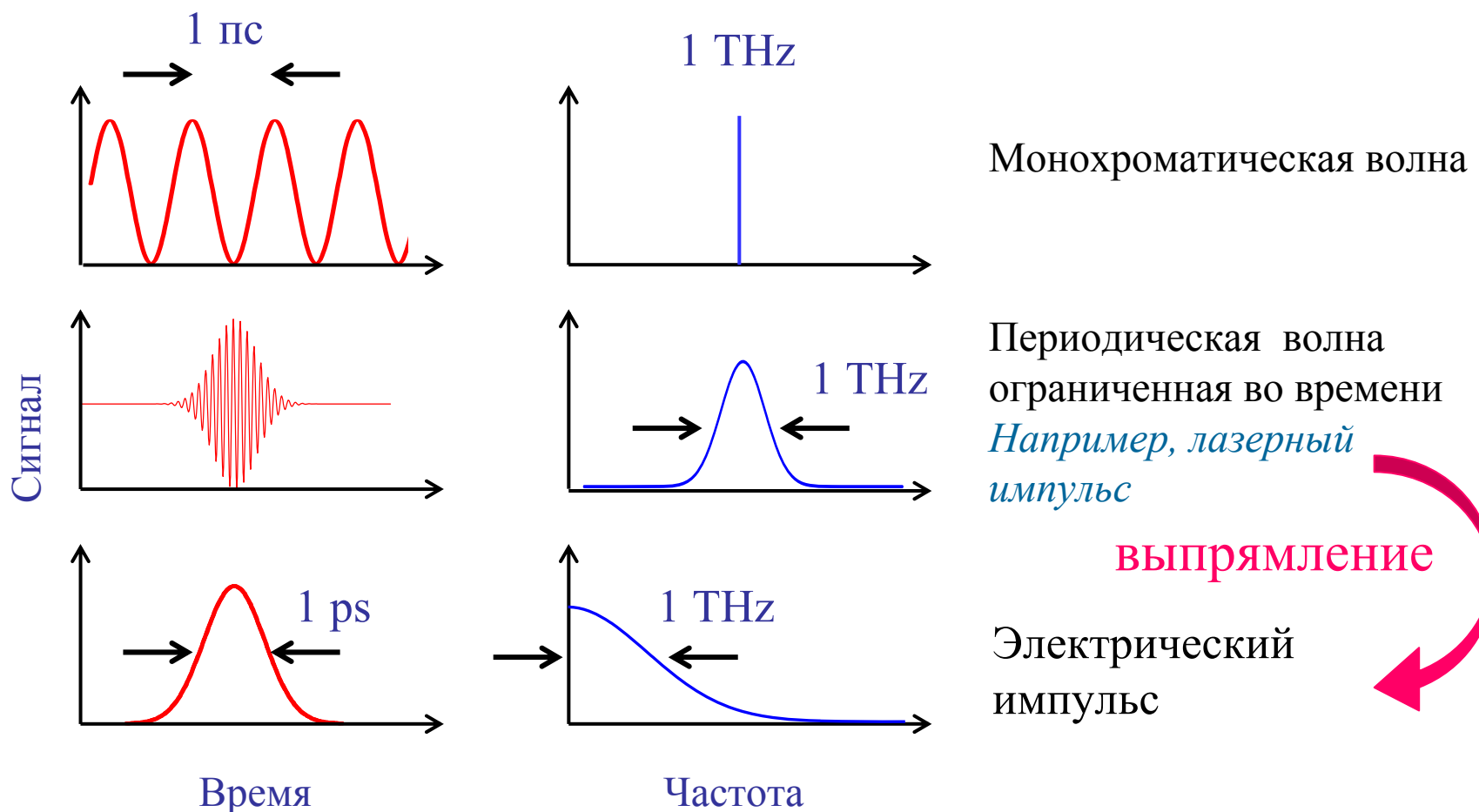
# Длительность импульсов и генерация ТГц импульсного излучения

Photoconductors : Si    SI-GaAs    a-Si    RD-SOS    LT-GaAs

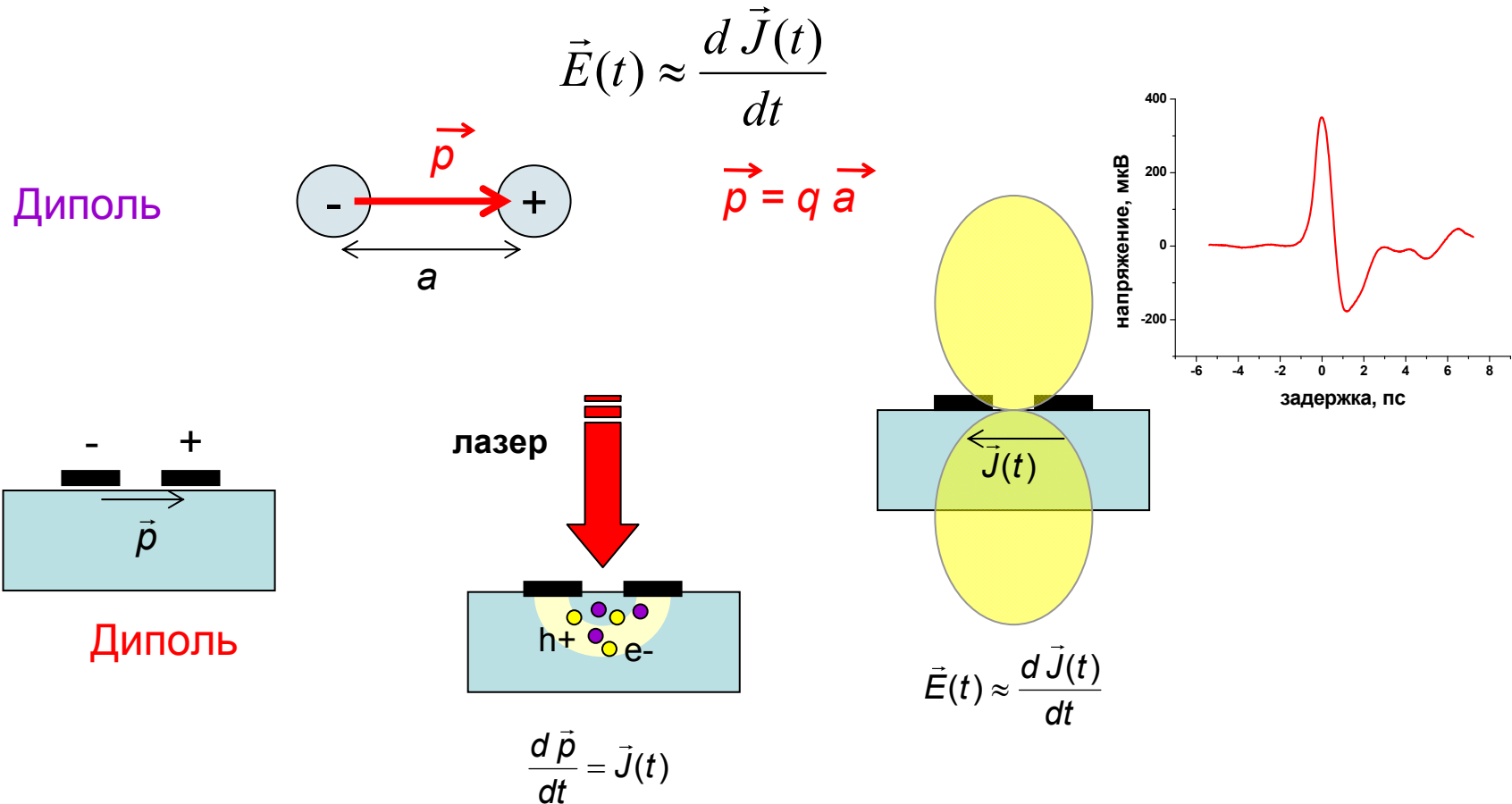


2002 год S.Kano etc  
15 фс – 60 ТГц

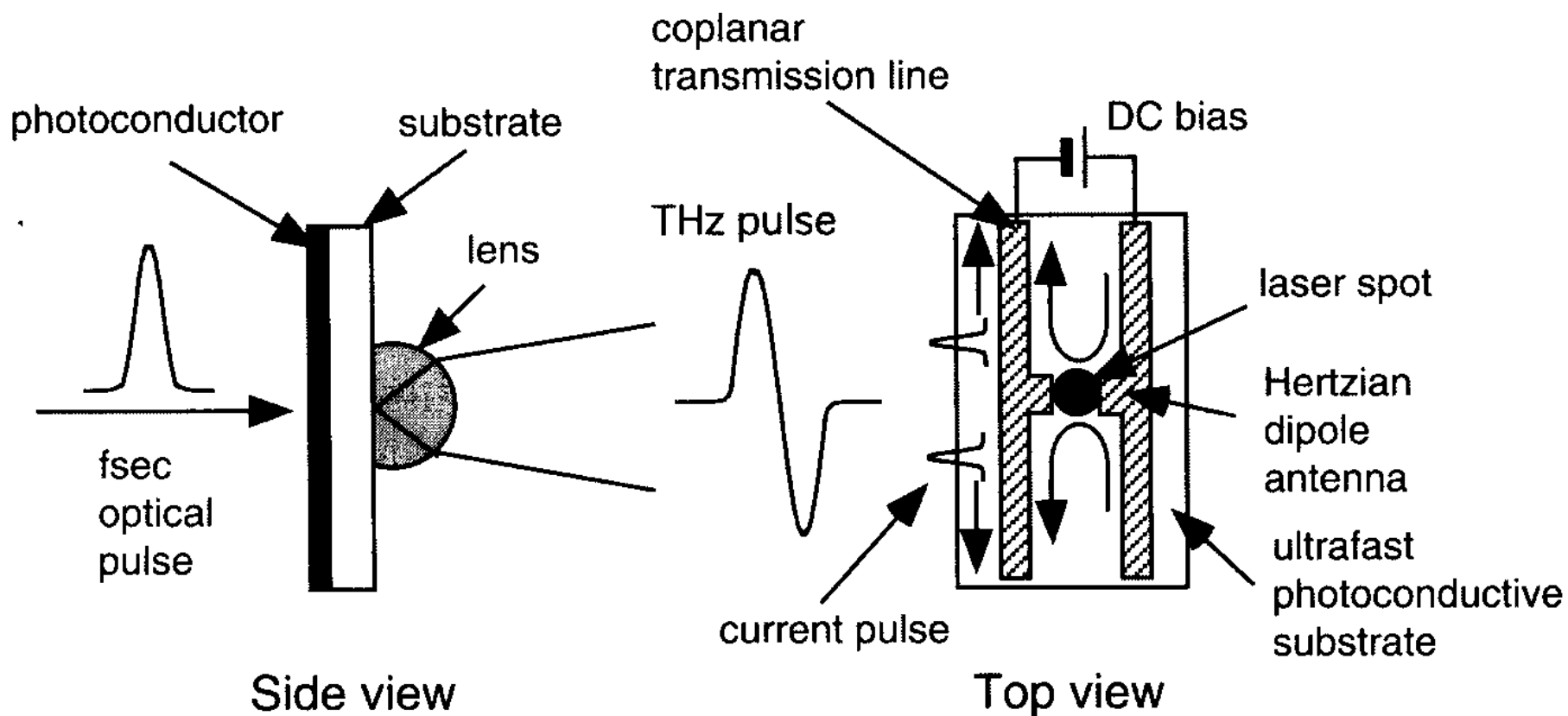
# Временное представление ↔ Частотное представление (соотношение неопределенности)



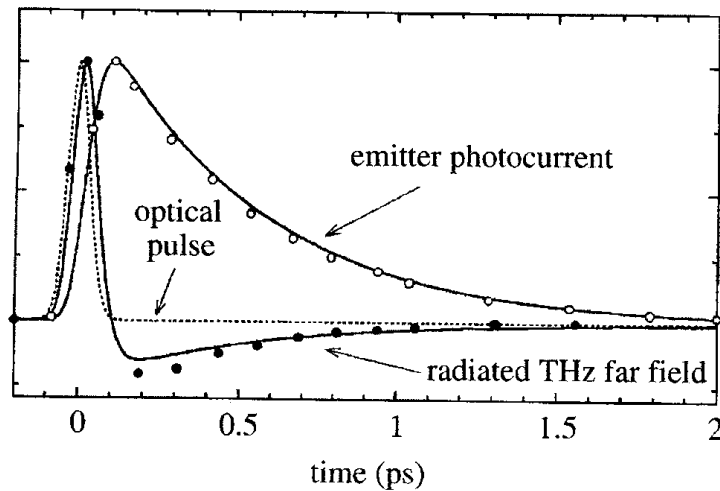
# Принцип генерации ТГц излучения с помощью фотопроводящей антенны



# Схема генерации ТГц импульса



# Временной профиль ТГц импульса



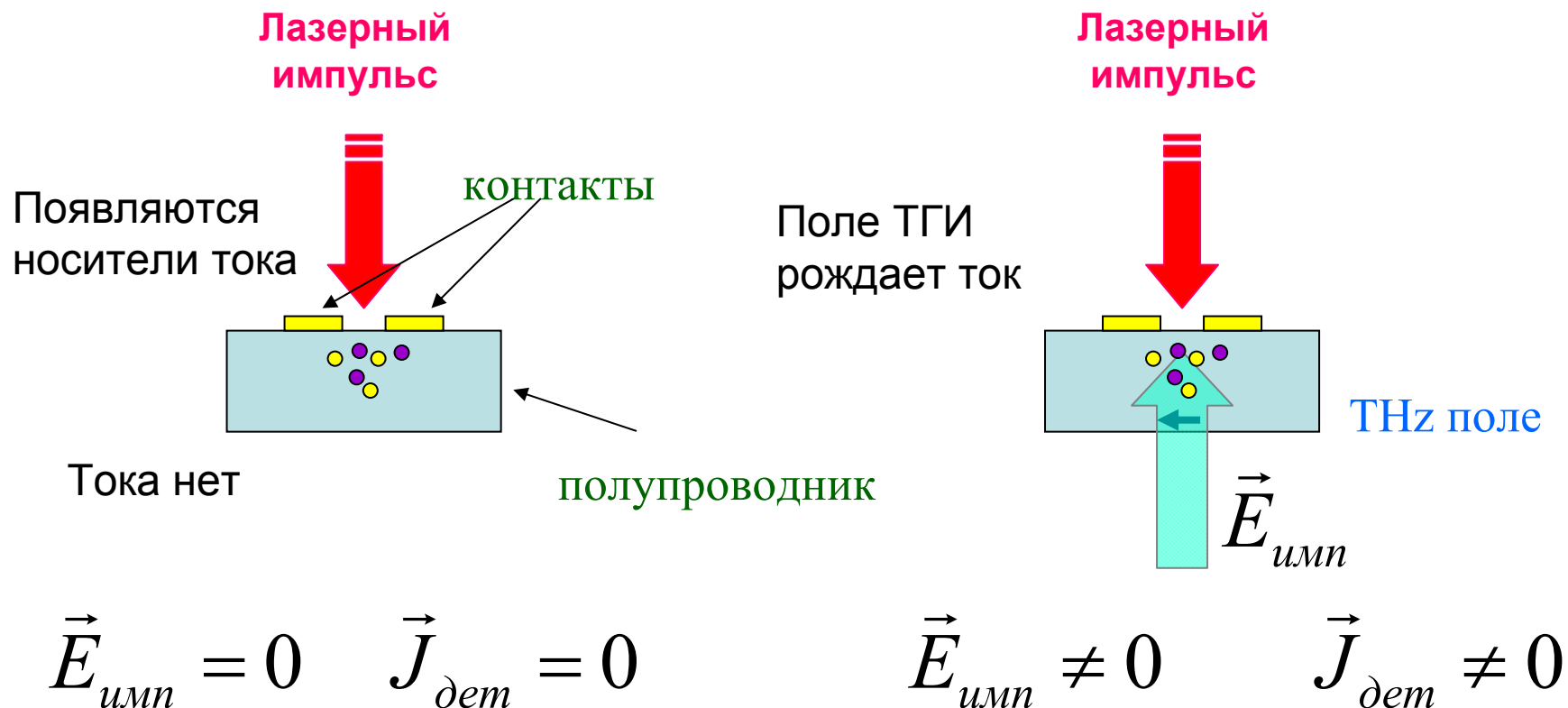
$$\frac{dv(t)}{dt} = -\frac{v(t)}{\tau} + \frac{q}{m} E(t),$$

$\tau$  – время релаксации момента;

$m$  – эффективная масса;

$n(t)qv(t)$  – импульсный отклик антенны.

# Детекторы терагерцового излучения: дипольная антенна



принцип детектирования:

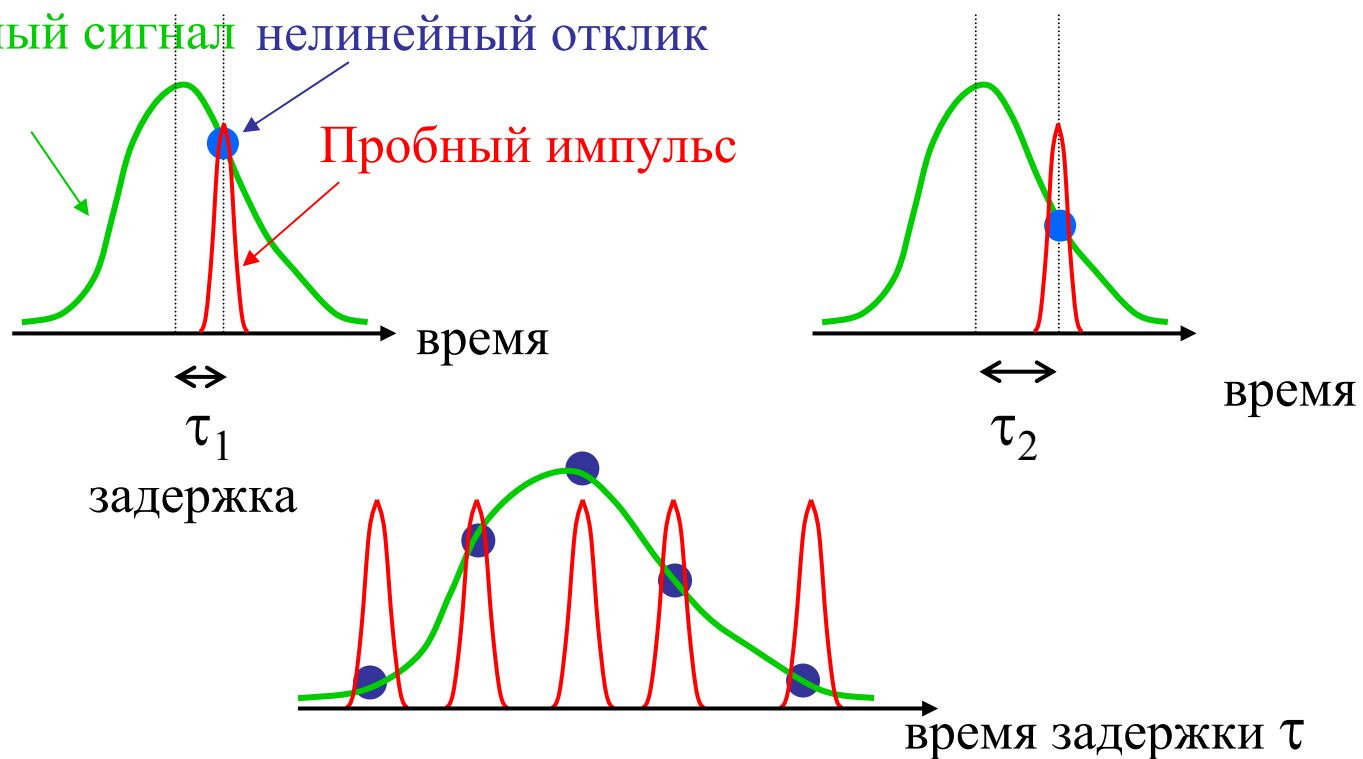
Измеряемое поле + фото носители = ток



# Детекторы ТГИ: принципы измерений

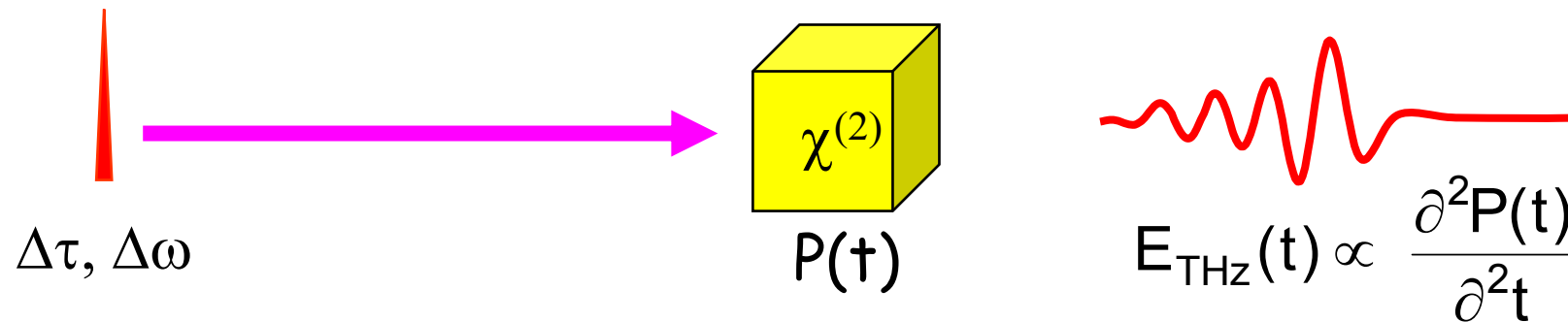
## Повторяющиеся сигналы

измеряемый сигнал нелинейный отклик



# ТГц излучение из ЭО кристаллов: Оптическое выпрямление

Лазерный импульс  $I(t, \omega, \Delta\omega)$  ЭО Кристалл ТГц импульс  $E_{\text{ТГц}}(t, \Omega)$



Соотношение неопределенностей:  $\Delta\tau\Delta\omega = 1$

$\Delta\omega$

разностная частота  $\Omega < \Delta\omega$  (лазерная линия)

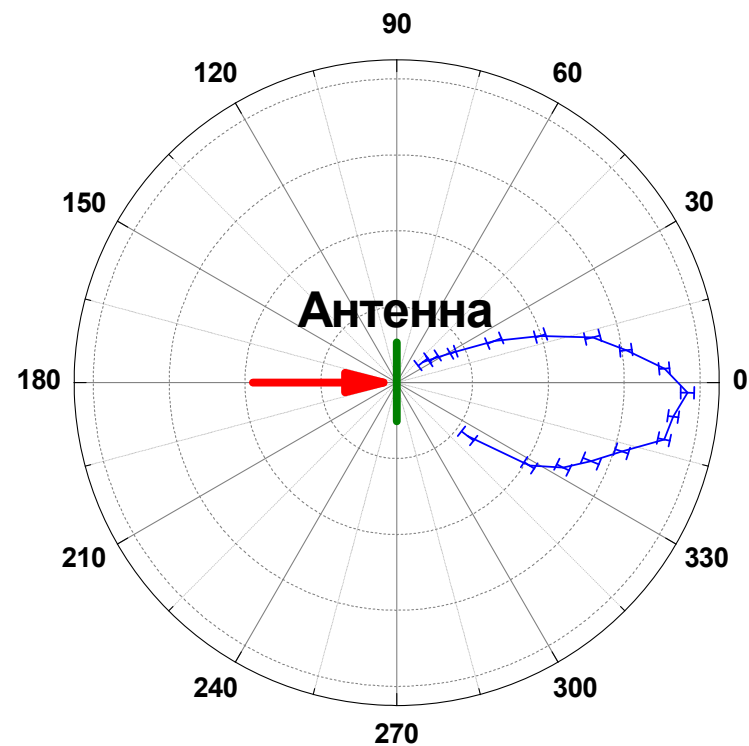
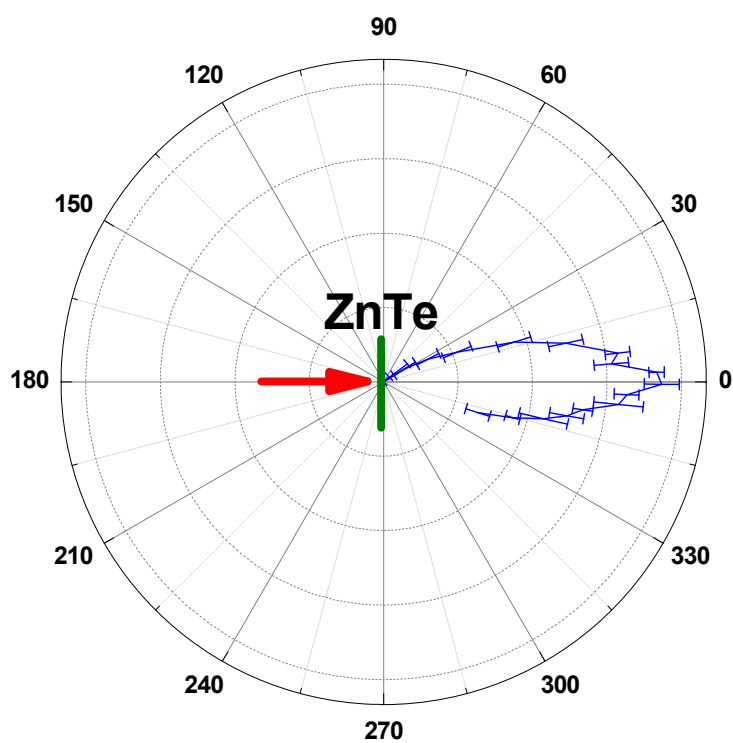
Поляризация:  $P(\Omega) = \chi^{(2)}(\Omega, \omega+\Omega, -\omega) E(\omega+\Omega)E^*(\omega)$

$$E_{\text{THz}}(t) \propto \frac{\partial J(t)}{\partial t} = \frac{\partial^2 P(t)}{\partial^2 t} = \chi^{(2)} \frac{\partial^2 I(t)}{\partial^2 t}$$

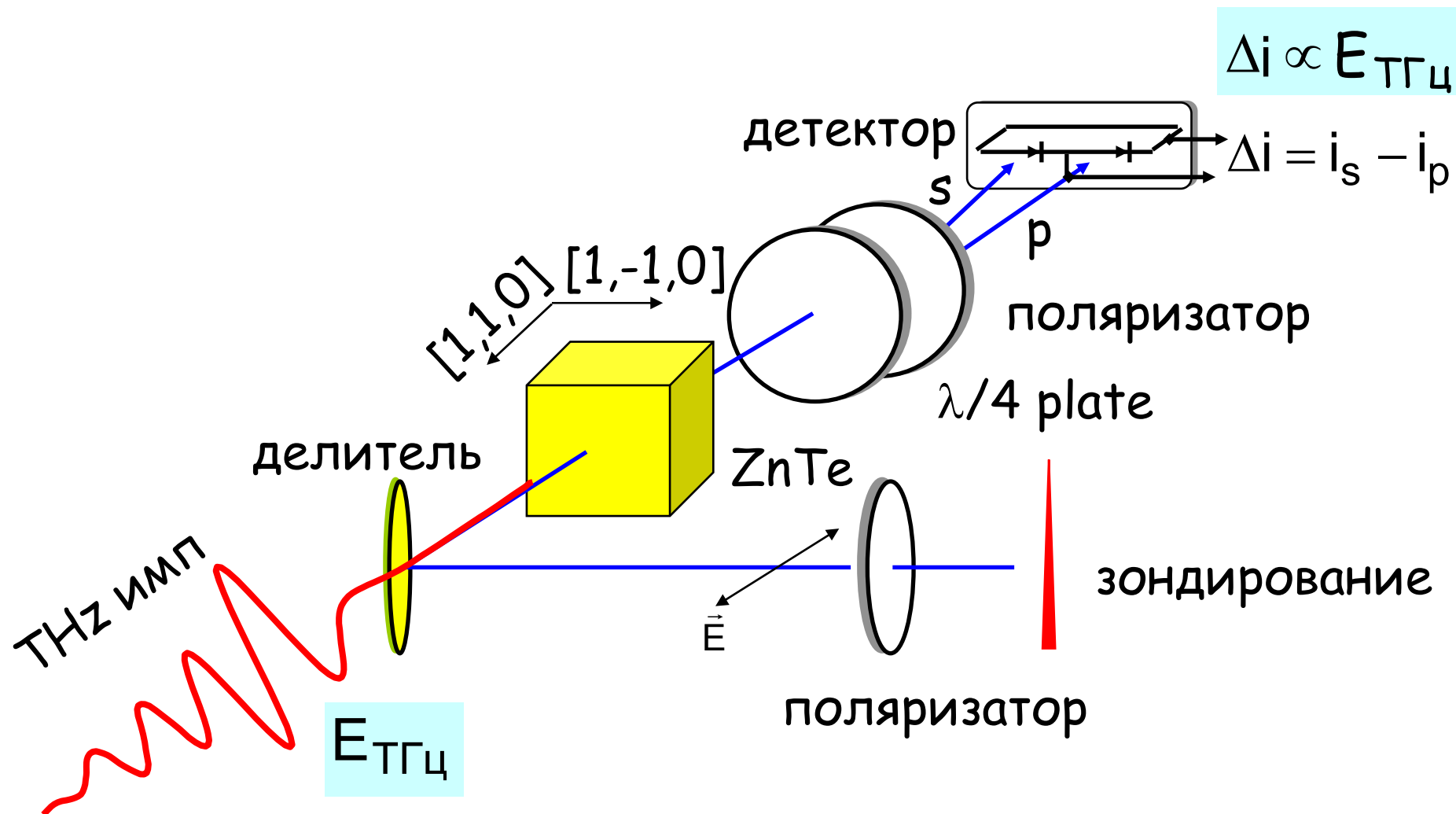
# Кристаллы для генерации (ОВ) и детектирования (ЭОД) ТГИ

crystal	EO coefficient	refractive index	DC dielectric constant	figure of merit (rectification)	GVD	EOS $V_{\pi}$	phonon $f_{TO}$	синхронизм
	(pm/V)			(pm/V)	(ps/mm)	(kV)	(THz)	$\lambda$ нм
ZnTe	$r_{41}= 4,04$	$n=2,853$	$\epsilon=10,1$	$\sim 45$	<b>1,1</b>	6,75	5,3	750–830
LiTaO <sub>3</sub>	$r_{33}= 30,5$ $r_{13}= 8,4$	$n_o=2,176$ $n_e=2,180$	$\epsilon_{1,2}=41$ $\epsilon_{1,2}=43$	$\leq 85$	14,1	2,01 7,27	6,23	-----
LiNbO <sub>3</sub>	$r_{33}= 30,9$ $r_{51}= 32,6$	$n_o=2,286$ $n_e=2,200$	$\epsilon_{1,2}=43$ $\epsilon_3=28$	$\leq 110$	14,2	1,71 1,82	4,5	-----
KTP	$r_{33}= 36,3$ $r_{23}= 15,7$	$n_e=1,866$	$\epsilon_{1,2}=11$ $\epsilon_3=15$	$\leq 109$	5,4	2,68		-----
DAST	$r_{11}= 77$	$n_o=2,46$ $n_e=1,70$	8,0 2,9	<b><math>\leq 600</math></b>	<b>1,22</b>	0,71 2,16	<b>2.28 i=1</b> <b>1.13 i=2</b> <b>1.50 i=3</b>	800
GaP		3.18	11.1				11	1030
InP		3.54	12.5				10,4	1230
ZnS		2.32	8.3				10,8	470
GaAs		3.63	13.2				8	1405

# Диаграммы направленности источников ТГИ

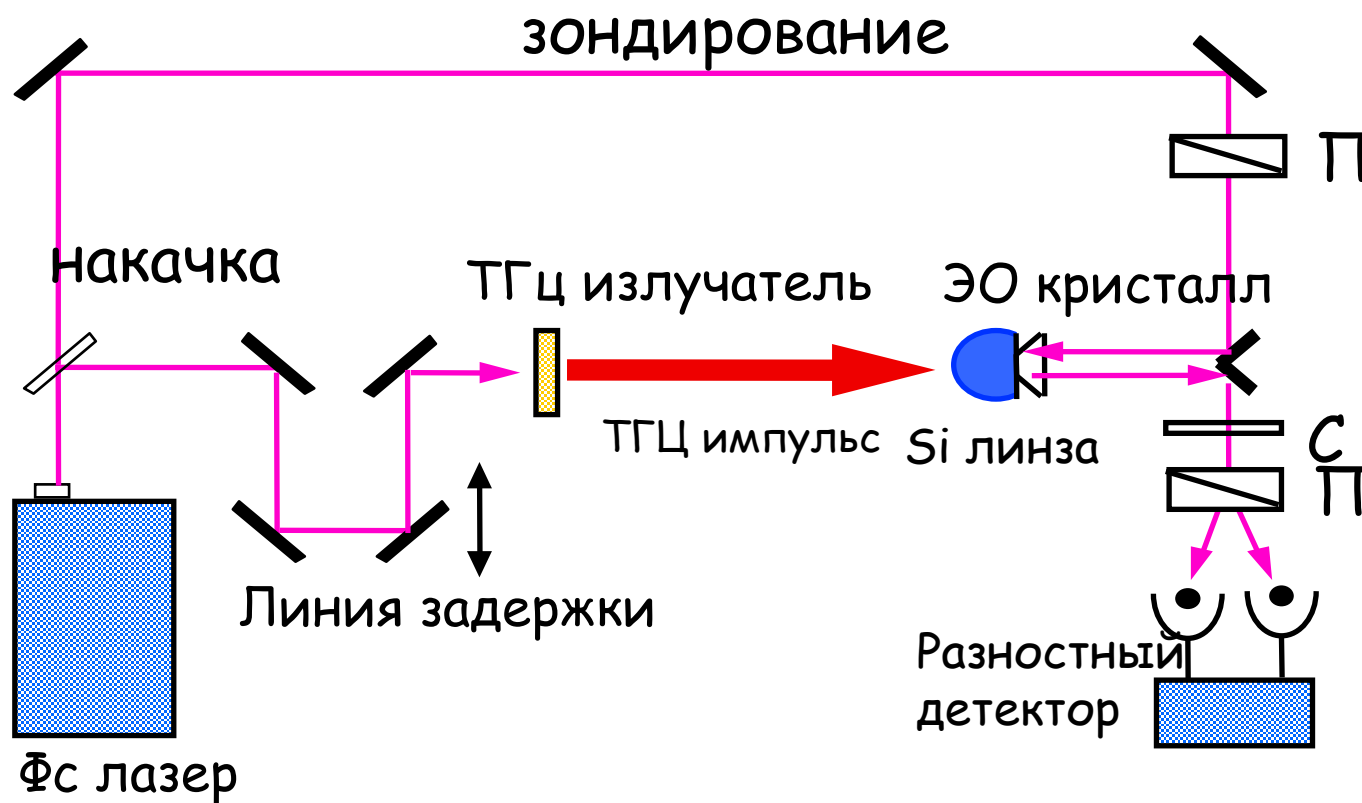


# ЭО детектирование ТГц импульсов (эффект Погкельса)

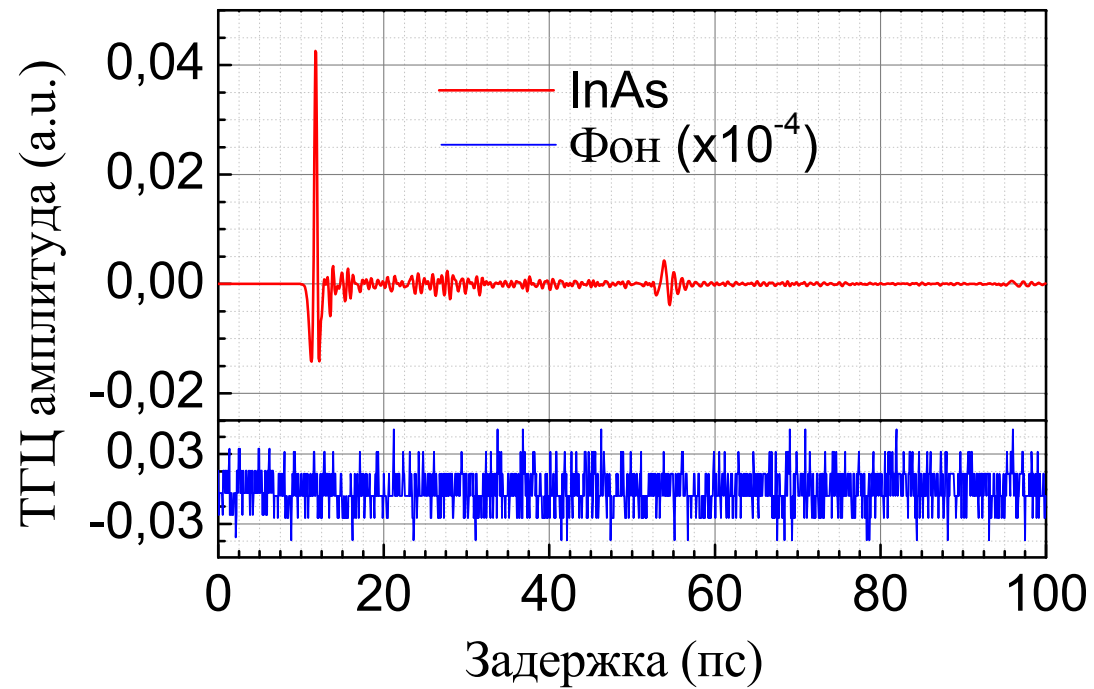


Q. Wu and X.-C. Zhang, *Appl. Phys. Lett.* **67**, 3523 (1995).

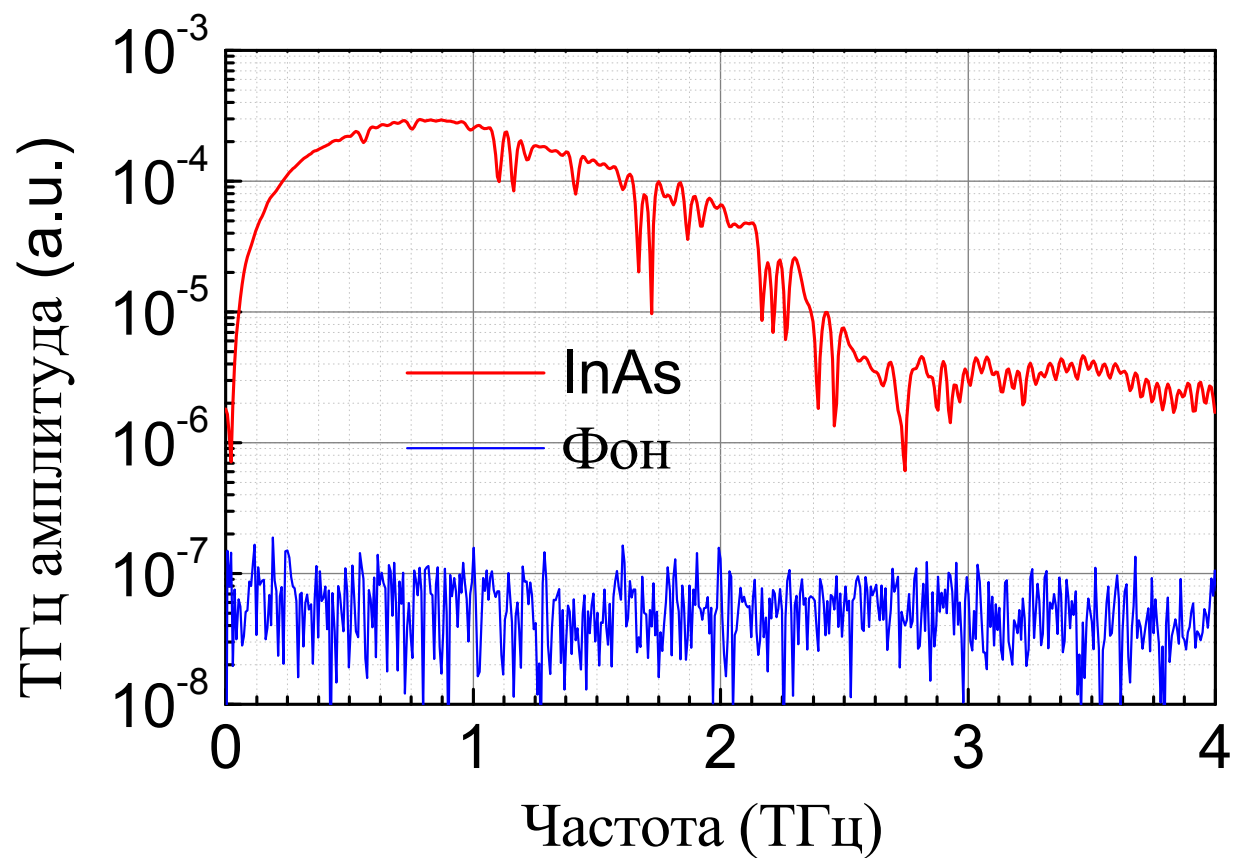
# Генерация и регистрация ТГц импульсов



# Сигнал и фон при ОВ в InAs



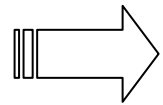
# FFT Сигнала и шума



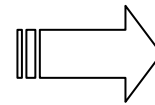


# Получение спектра поглощения вещества

**временной профиль  
терагерцового  
импульса**

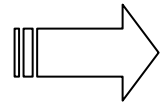


**Фурье**

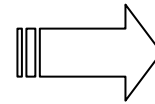


**спектр  
опорного  
сигнала**

**временной профиль  
терагерцового  
импульса, прошедшего  
через исследуемое  
вещество**



**Фурье**

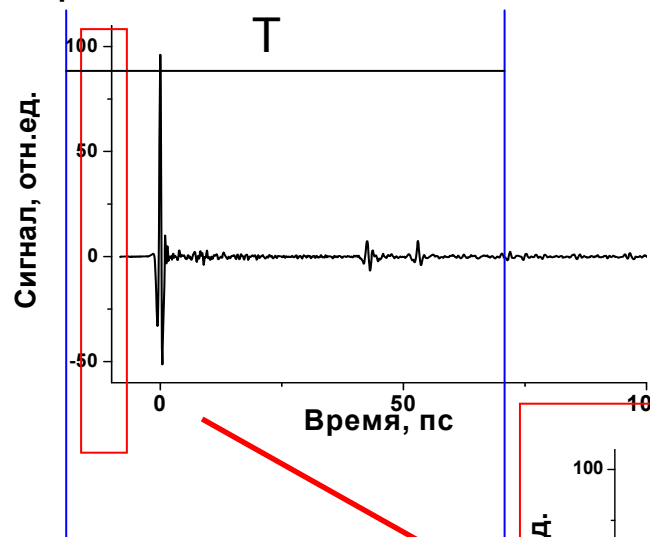


**спектр  
сигнала, содержащего  
информацию о  
линиях поглощения  
вещества**

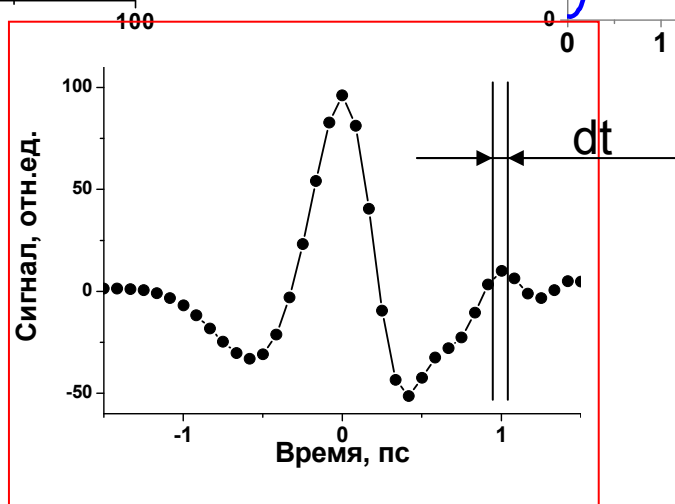
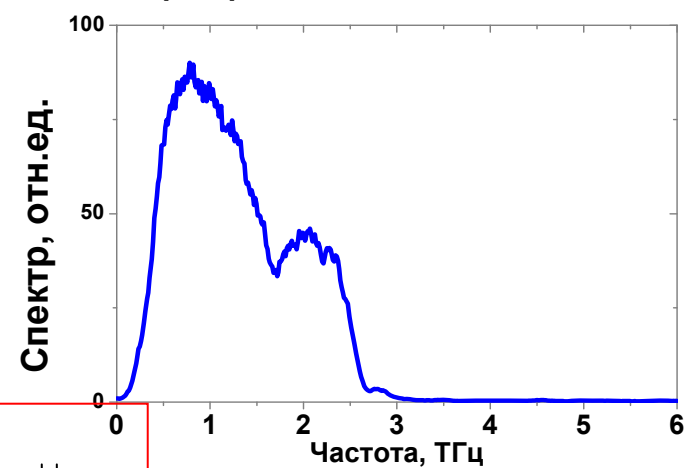
$$\text{спектр поглощения исследуемого вещества} = \frac{\text{спектр сигнала, прошедшего через вещество}}{\text{спектр опорного сигнала}}$$

# Параметры временной выборки

Временной сигнал с детектора



Спектр временного сигнала



$$df = 1/T$$

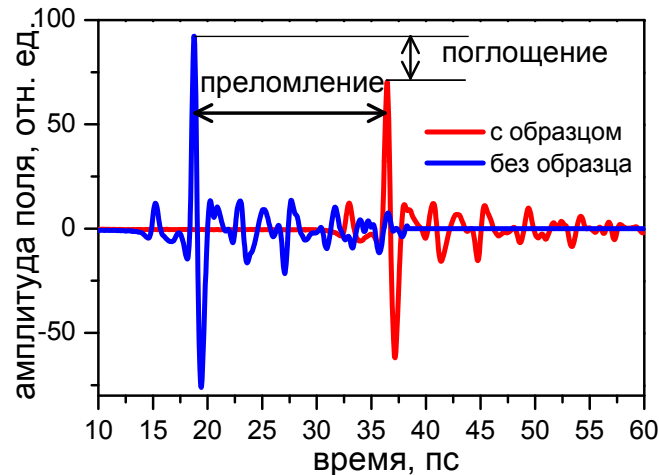
$$2F_N = 8 \text{ ТГц}$$

$$dt < 0.125 \text{ пс}$$

# Измерение $\alpha$ и $n$

## • Алгоритм

$$E_{rep}(t), E_{sig}(t)$$



$$|E_{rep}(\omega)|, |E_{sig}(\omega)| \text{ и } \varphi_{rep}(\omega), \varphi_{sig}(\omega)$$

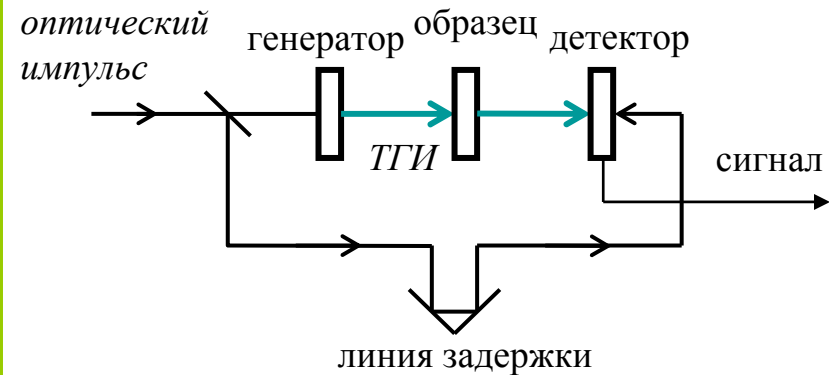


$$\frac{|E_{rep}(\omega)|}{|E_{sig}(\omega)|}, \varphi(\omega) = \varphi_{rep}(\omega) - \varphi_{sig}(\omega)$$



$$\begin{cases} n'(\omega) = \frac{c \cdot \varphi(\omega)}{\omega \cdot d} + 1 \\ \alpha(\omega) = \frac{1}{d} \ln \left| \frac{E_{rep}(\omega)}{E_{sig}(\omega)} \right| \end{cases}$$

## □ Схема спектрометра



# Терагерцовый импульсный спектрометр в МГУ



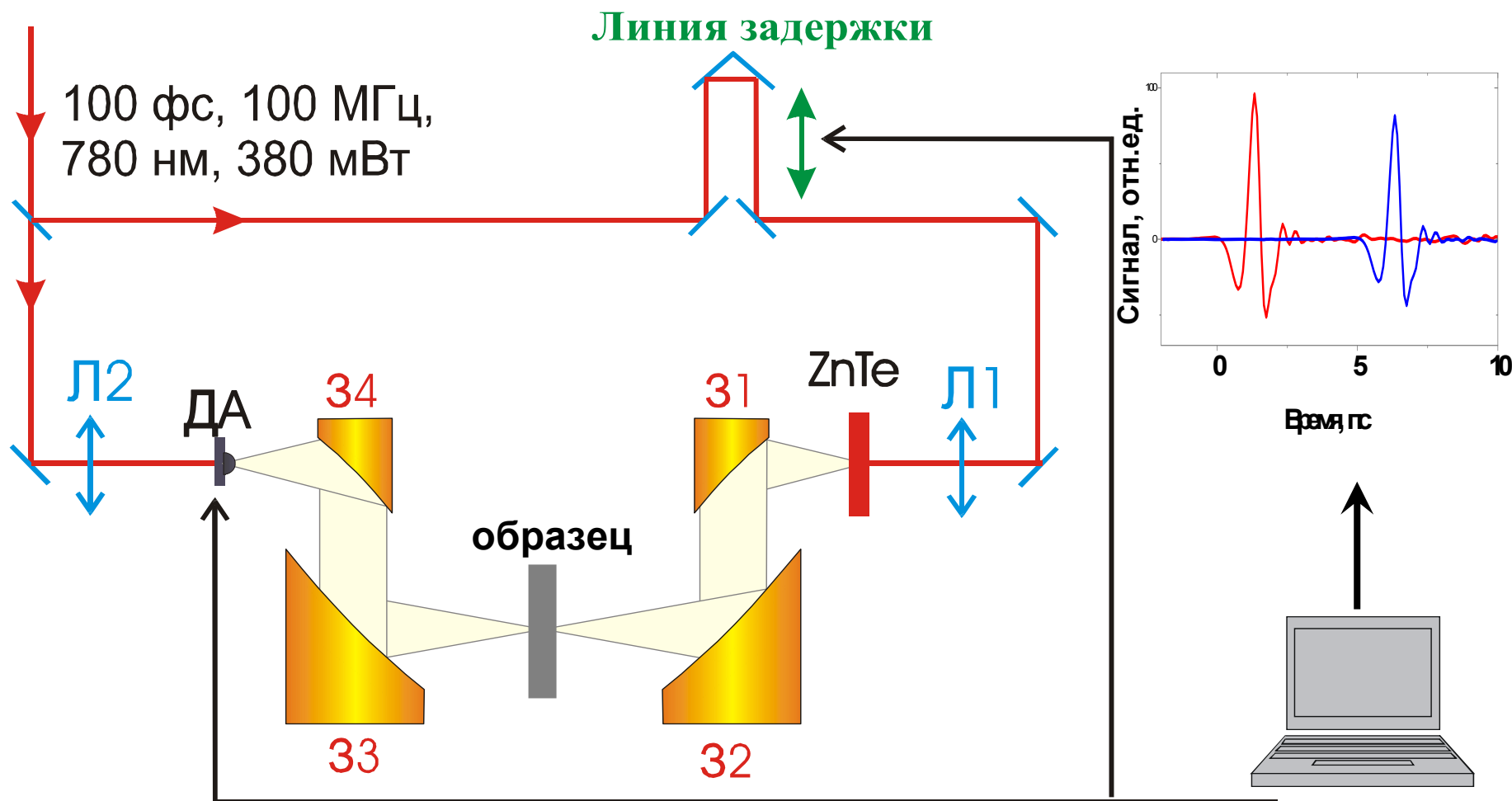
## Параметры лазера

80 фс, 100 МГц, 1.8 Вт, 720-1000 нм

## Характеристики спектрометра

- спектральный диапазон (5 - 100  $\text{cm}^{-1}$ )
- спектральное разрешение (0.3  $\text{cm}^{-1}$ )
- временное разрешение – 100 фс
- Отношение «сигнал/шум» – 1000:1

# Терагерцовый импульсный спектрометр в МГУ



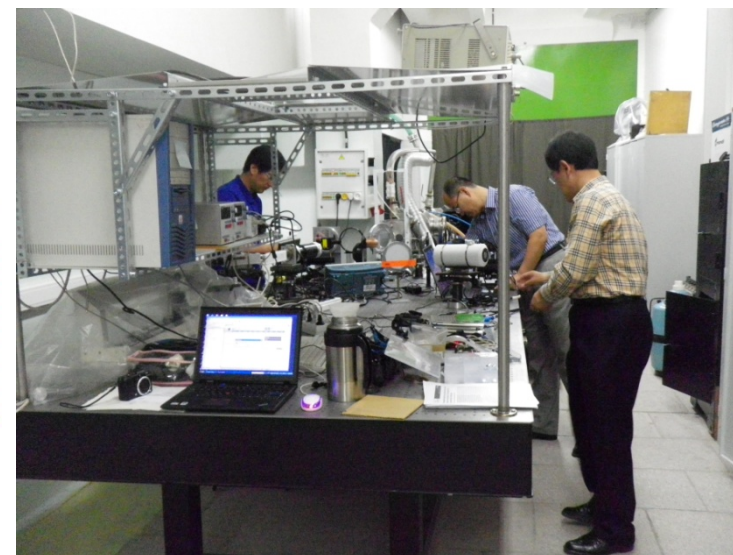
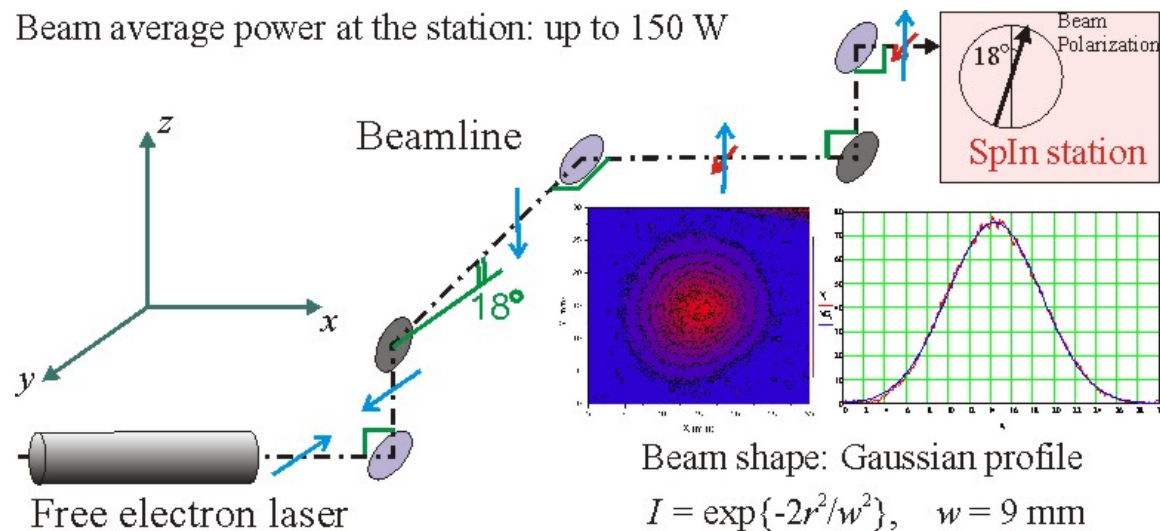
# Метрология терагерцового излучения

- Разработка устройств для управления мощным терагерцовым излучением (оптика)
  - Измерение параметров излучения
- Визуализация терагерцового излучения

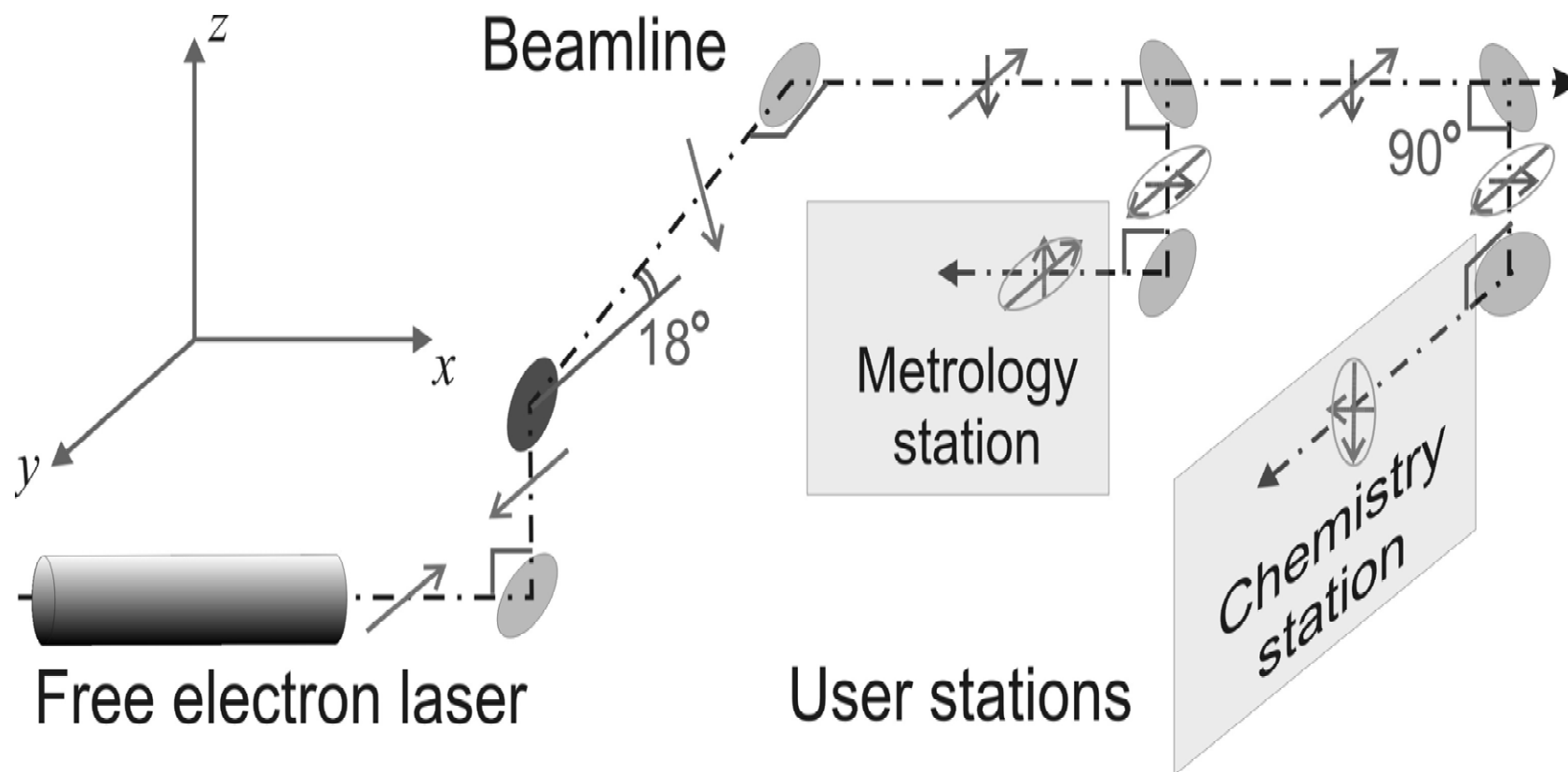
# Станции пользователей на НЛСЭ

Лазерное излучение поступает на станции через транспортный канал, заполненный сухим азотом

Beam average power at the station: up to 150 W

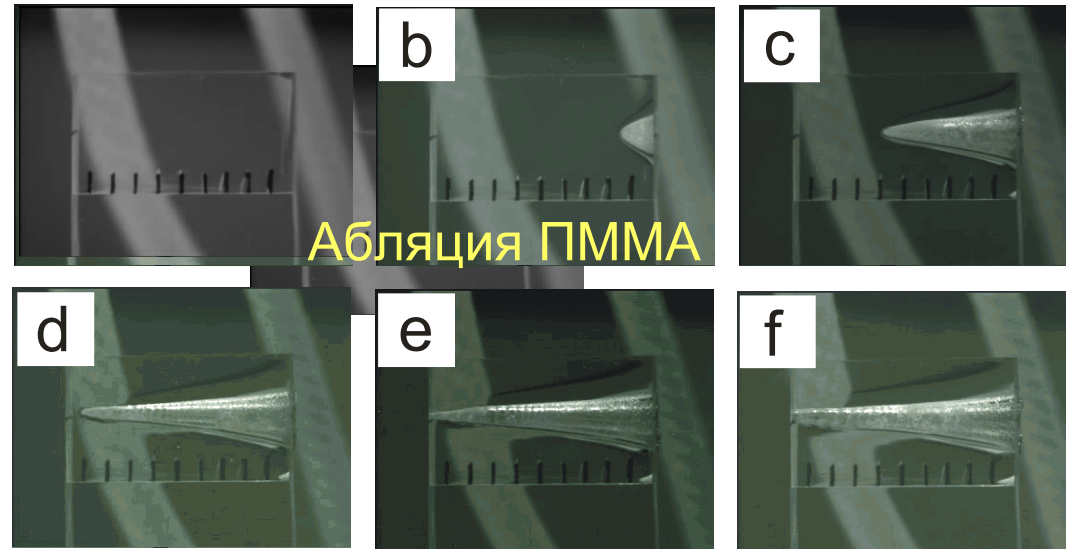
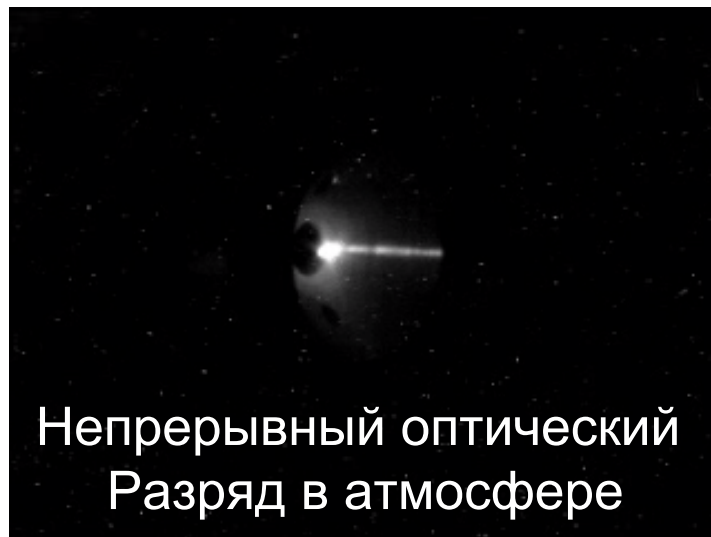


# Схема подвода излучения к станциям пользователей на НЛСЭ



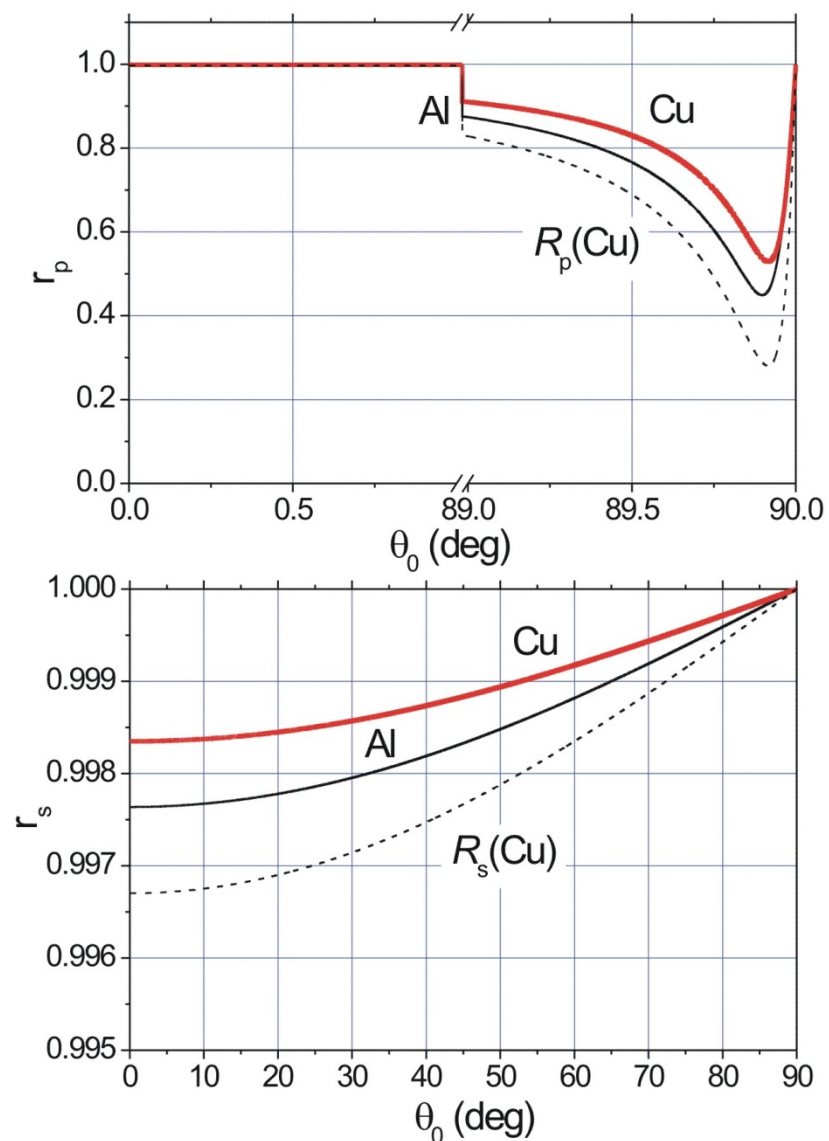


Высокая средняя мощность ЛСЭ (до 400 W)  
в комбинации с высокой пиковой мощностью (до 1 MW)  
позволяет проводить уникальные эксперименты

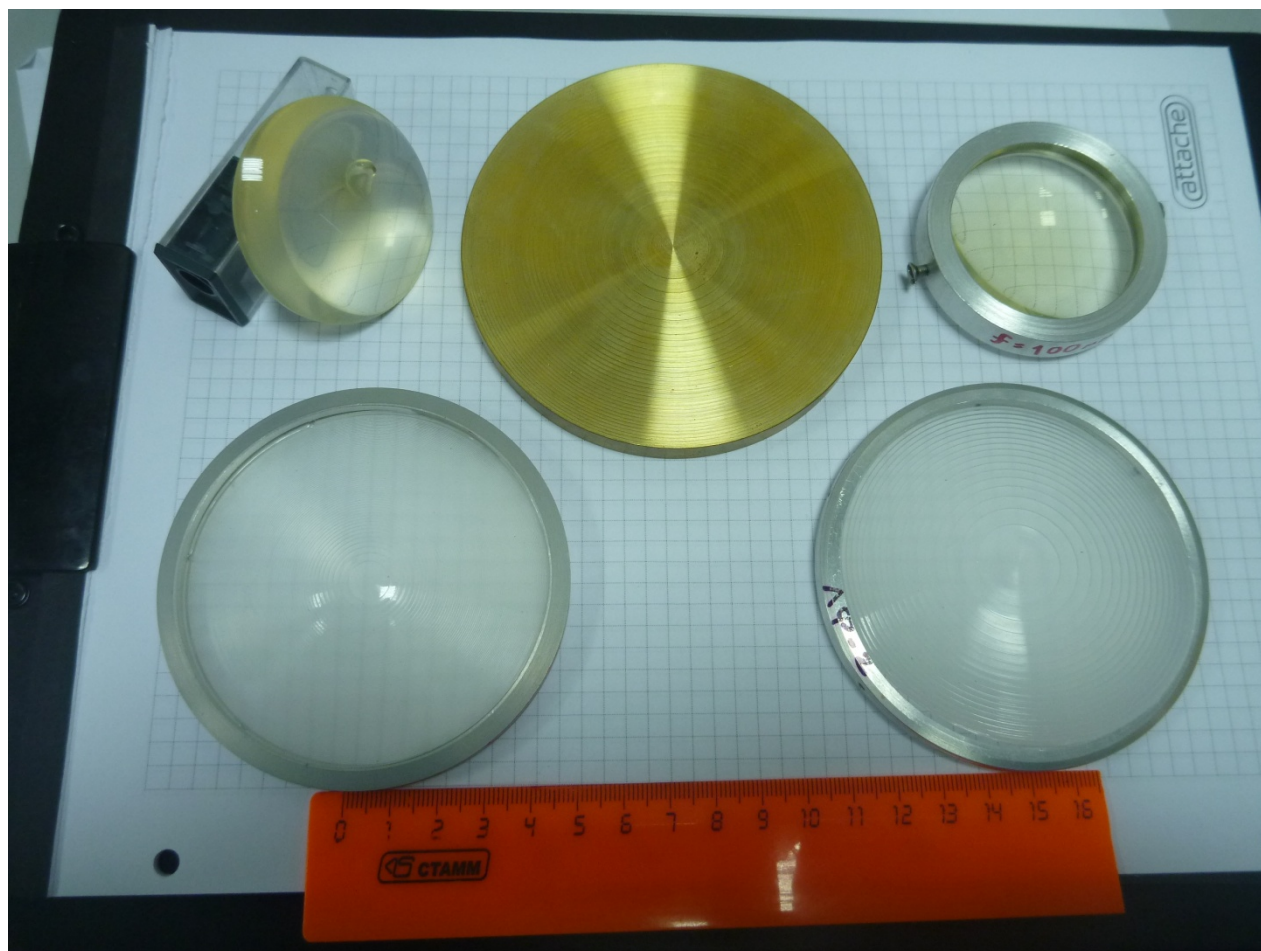


- ◆ Фокусировка излучения ЛСЭ параболическим зеркалом ( $f=1.0$  cm) позволяет зажечь непрерывный оптический разряд в атмосфере ignites a continuous optical discharge
- ◆ Пучок ЛСЭ диаметром 8 мм просверливает в ПММА отверстие длиной 50 мм за 3 минуты (возгонка без плавления)
- ◆ Эти свойства дают уникальные возможности для модификации материалов, создания новых материалов и их диагностики

# Отражение излучения с длиной волны 130 мкм от поверхностей металлов как ф-ция угла падения



# Киноформы и линзы



# Квазиоптические элементы

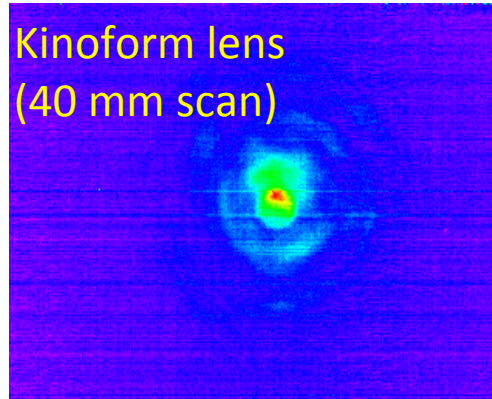
Большая мощность НЛСЭ требует создания оптических элементов устойчивых при высокой мощности излучения

ТГц видео, записанные в реальном времени матричным микроболометрическим приемником : Пучок ЛСЭ, сфокусированный киноформной линзой и бинарной френелевской линзой  
(матрица перемещалась моторизованной подвижкой)

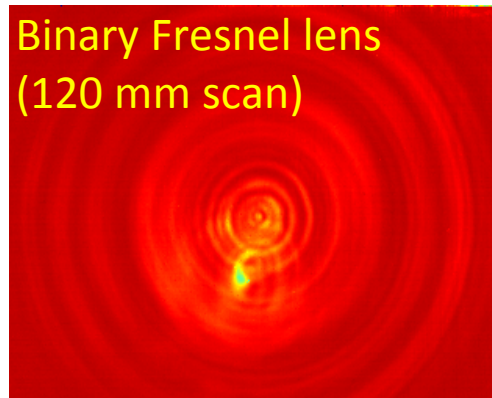
Бинарная френелевская линза на 0.8-мм кремниевой пластинке с антиотражающим покрытием



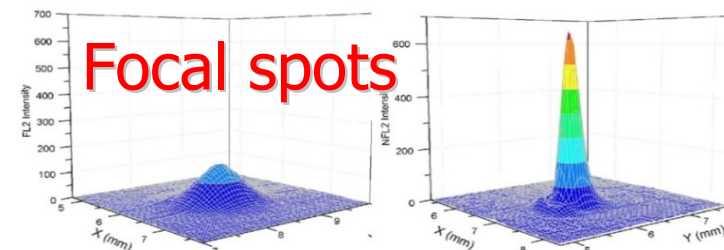
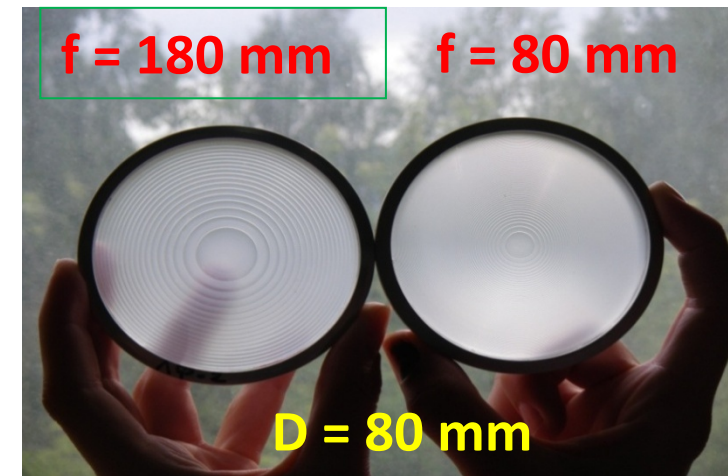
Kinoform lens  
(40 mm scan)



Binary Fresnel lens  
(120 mm scan)



0.8-mm полипропиленовая киноформная линза



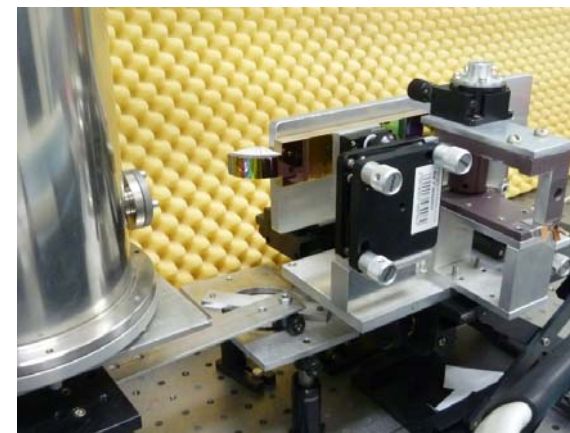
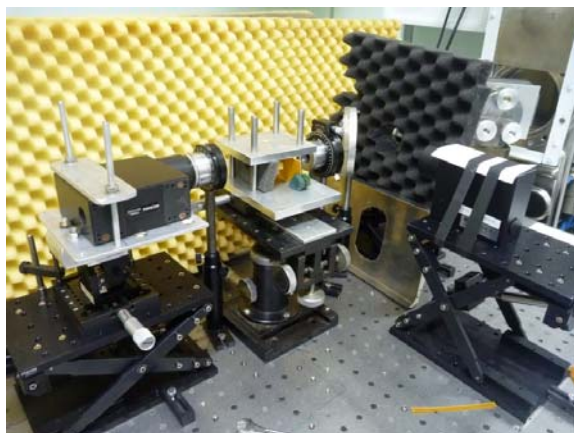
$d_{1/2} = 0.8 \text{ mm}$        $d_{1/2} = 0.3 \text{ mm}$

Институт систем обработки изображений РАН, Самара Самарский аэрокосмический институт, ТИДЕКС, СпБ

Конструкторско-технологический институт научного приборостроения СО РАН, Новосибирск

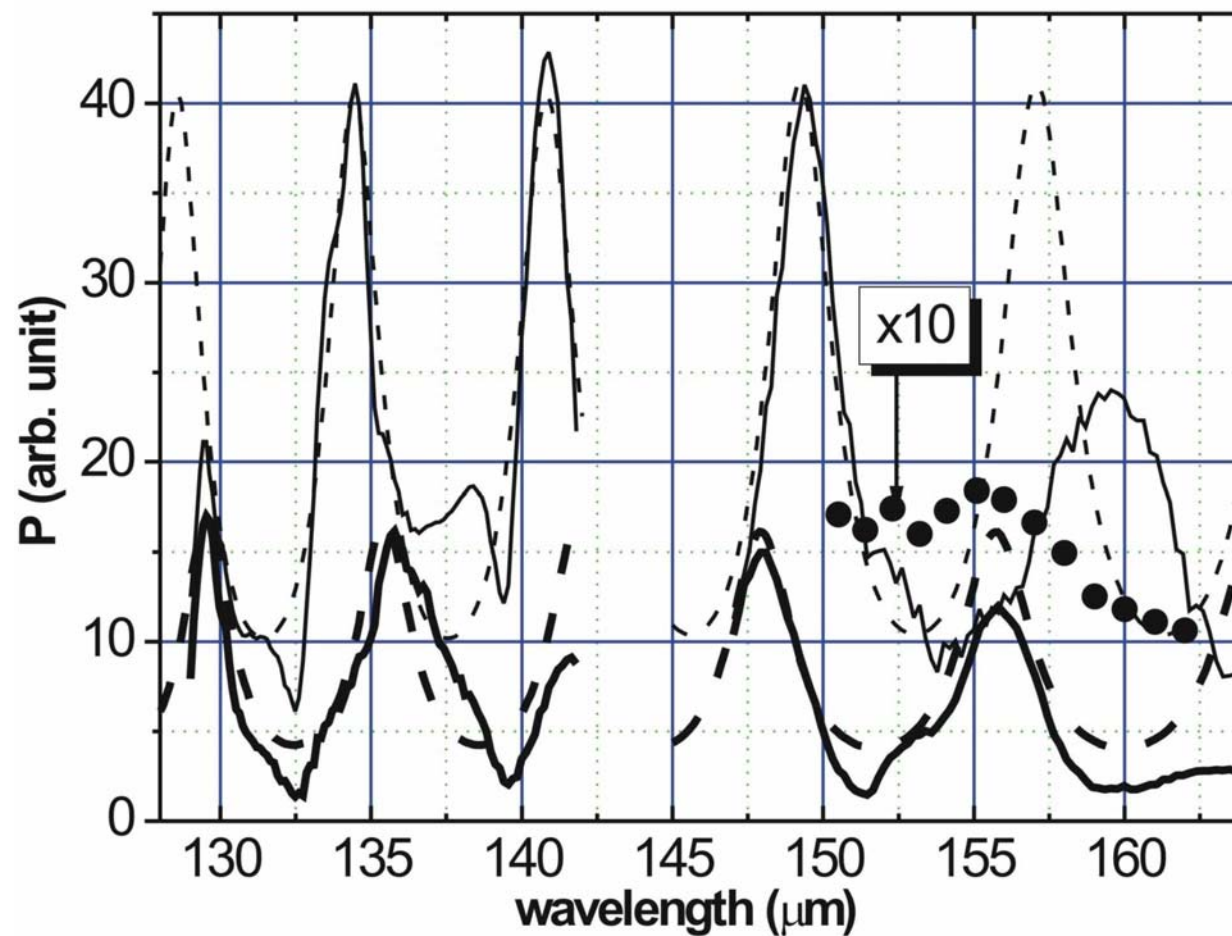
# Одноканальные детекторы терагерцового излучения

Detector	NEP, Вт/Гц <sup>1/2</sup>	Spectral range, micron
Pyroelectric , MG-33	$10^{-9}$	2-20 ( $\rightarrow$ 200)
Goley cell, GC-1P	$1.4 \cdot 10^{-10}$	15-8000
Microbolometer matrix	$2 \cdot 10^{-10}$ @130 $\mu\text{m}$	(8-500)
HEB, RS 1-12 T – 0.05	$(1-2) \cdot 10^{-11}$	25-300

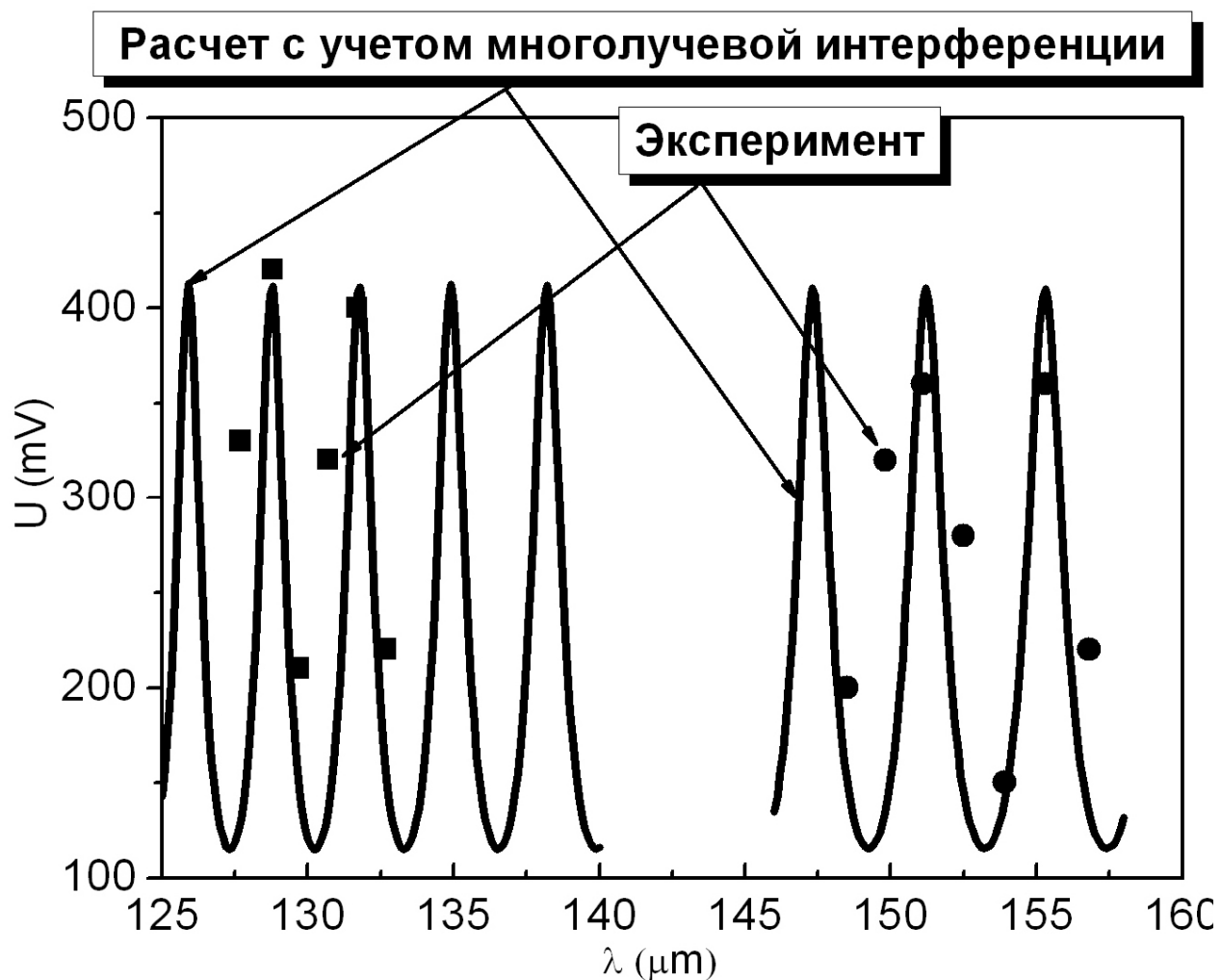


Применение детектора Голя (TYDEX) и болометра на «горячих электронах» (МГПИ) для исследования поверхностных плазмонов

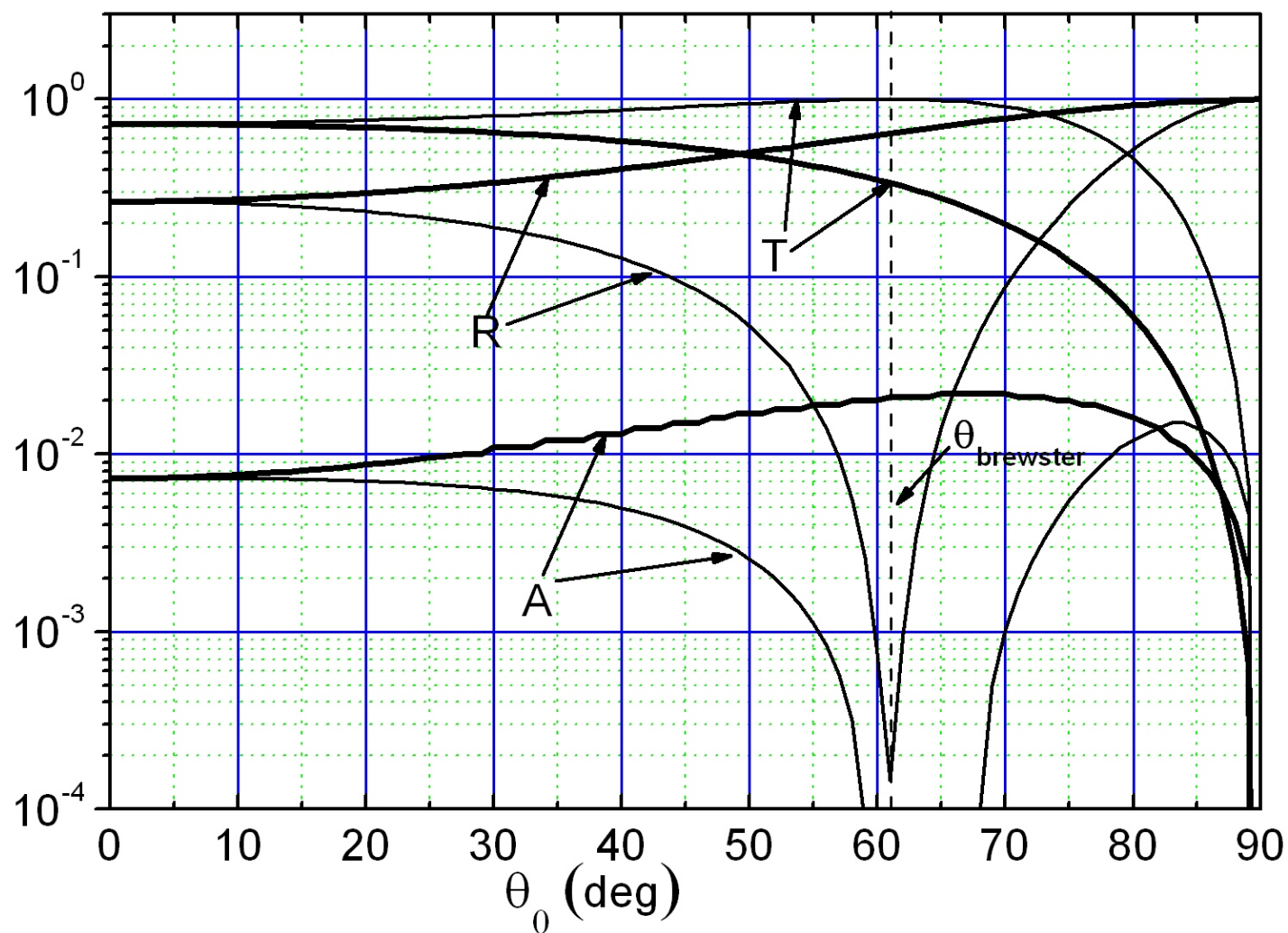
# Влияние многолучевой интерференции на спектральную чувствительность пьезоэлектрического детектора



# Влияние многолучевой интерференции на спектральную чувствительность болометра ИМО-3

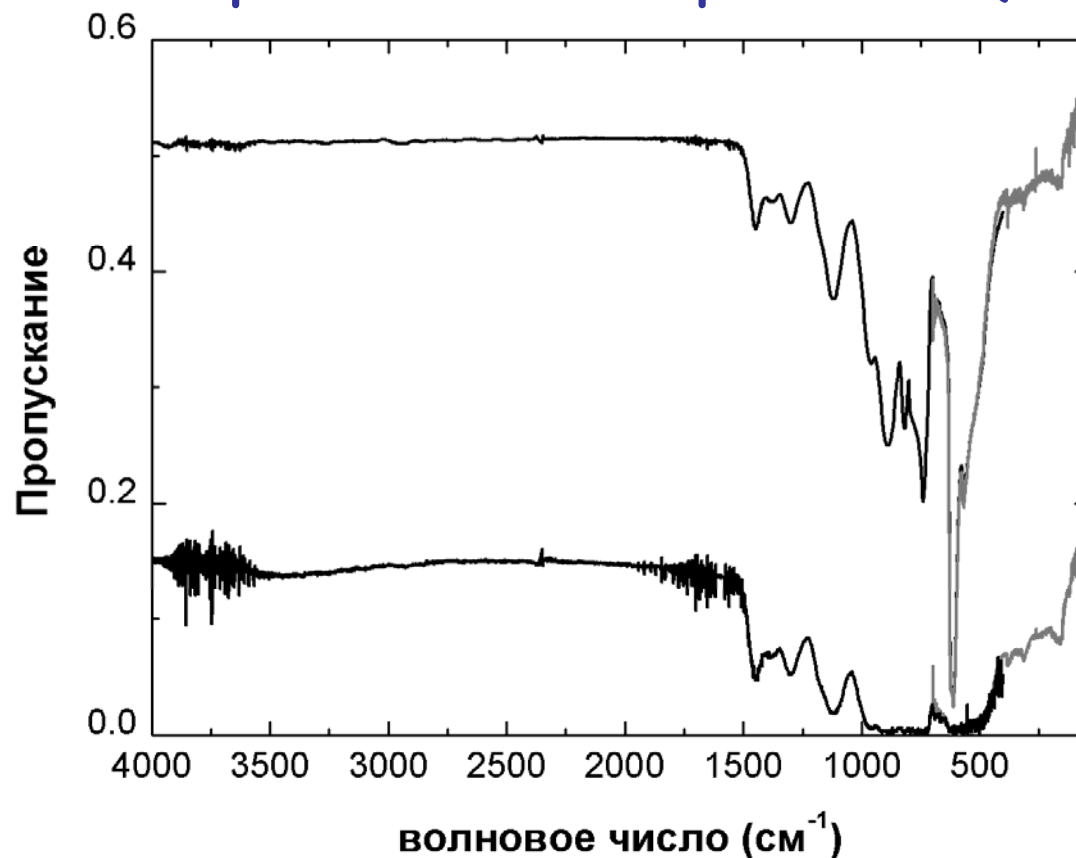


# Френелевское отражение от тонкой лавсановой пленки излучения с длиной волны 130 мкм





# Пропускание излучения с длиной волны 130 мкм 2-х миллиметровой кремниевой пластинкой и кремниевой призмой (внизу)



# Устройства, используемые для визуализации терагерцового излучения в реальном времени

## A. Визуализация с промежуточным "тепловым экраном":

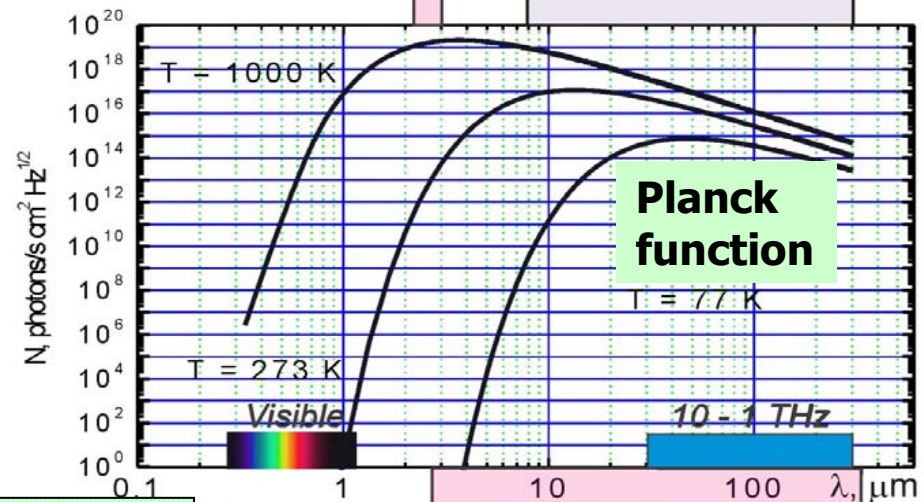
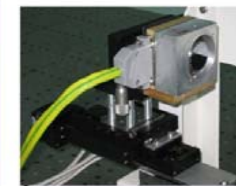
- Термограф
- Термочувствительный люминесцентный экран (ТЧЛЭ)
- Термочувствительный интерферометр (ТЧИ) (абсолютный измеритель мощности, не требует калибровки!!!)

## B. Прямая визуализация матричным микроболометрическим приемником (ММБП)

128x128  
77 K  
thermal recorder  
(2.5 - 3  $\mu\text{m}$ )  
ISP SB RAS



320x240  
Uncooled  
Microbolometer  
FPA (8 - 250  $\mu\text{m}$ )  
ISP SB RAS



Thermal sensitive  
interferometer  
(0.15 - 0.35 & 3.8 - 250  $\mu\text{m}$ )  
BINP SB RAS

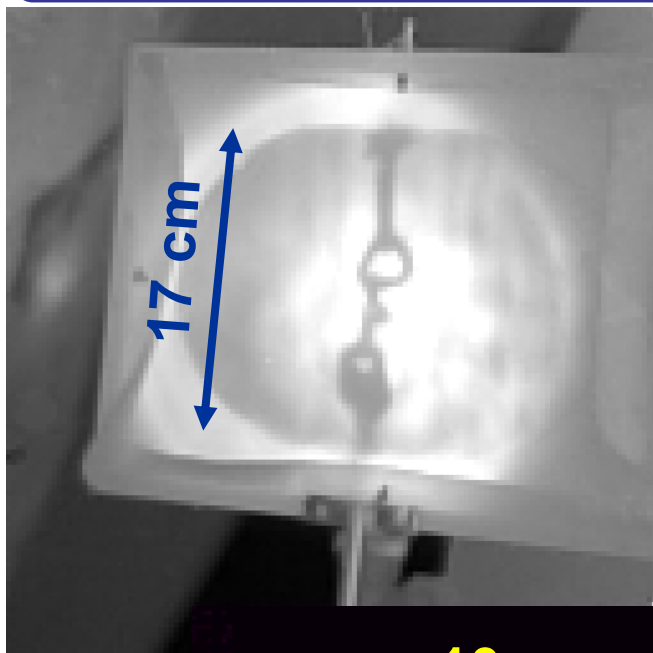


Thermal sensitive phosphor screen  
"thermal image plate" (3 - 250  $\mu\text{m}$ )  
Macken Instr., Inc.



# Охлаждаемый до 77 К термограф размером 124x124

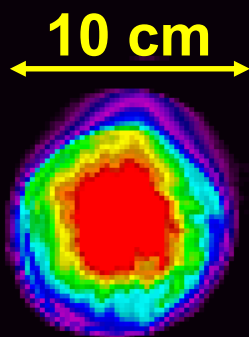
Ключи в картонном конверте



Изображение 6-мм отверстий в металлической пластинке



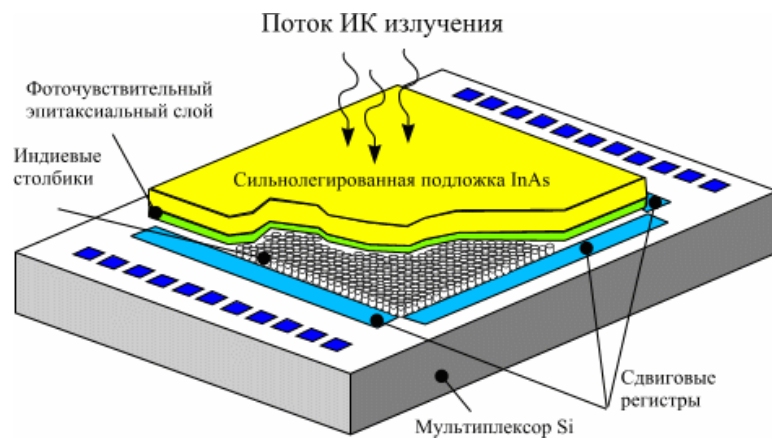
Дифракционная картина на двух отверстиях ( $d=6$  мм,  $\Delta=14$  мм)



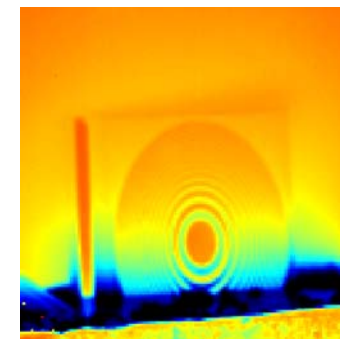
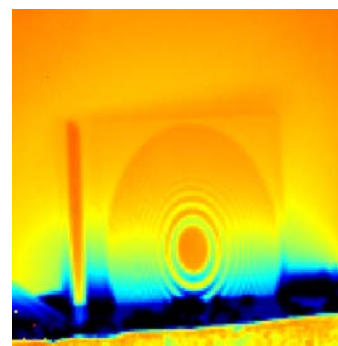
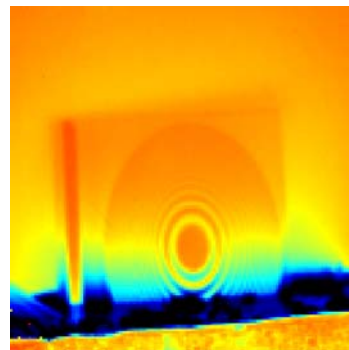
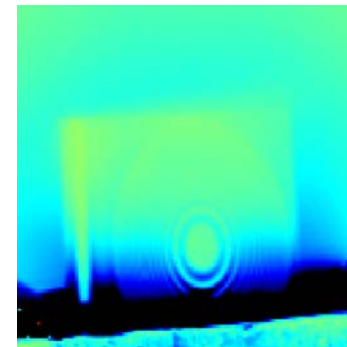
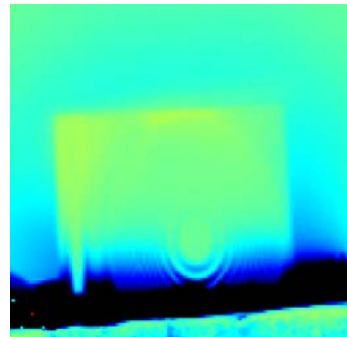
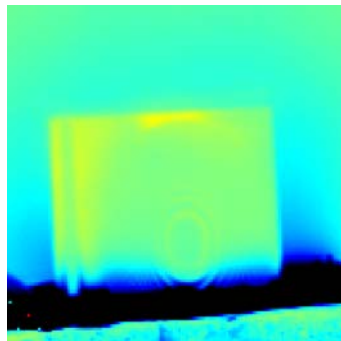
Сечение терагерцового пучка лазера на свободных электронах на расстоянии 13 метров



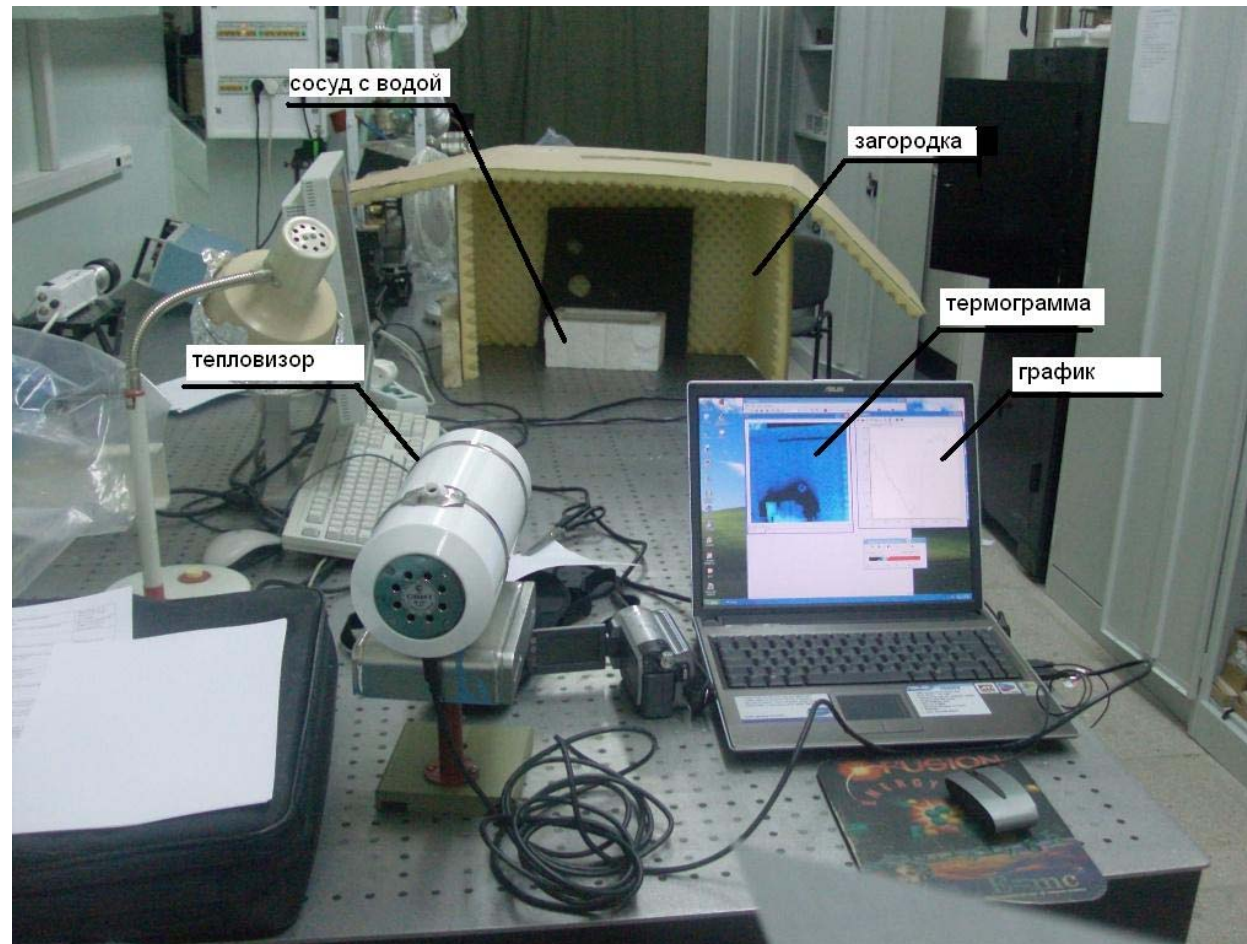
# Охлаждаемый до 77 К термограф размером 124x124



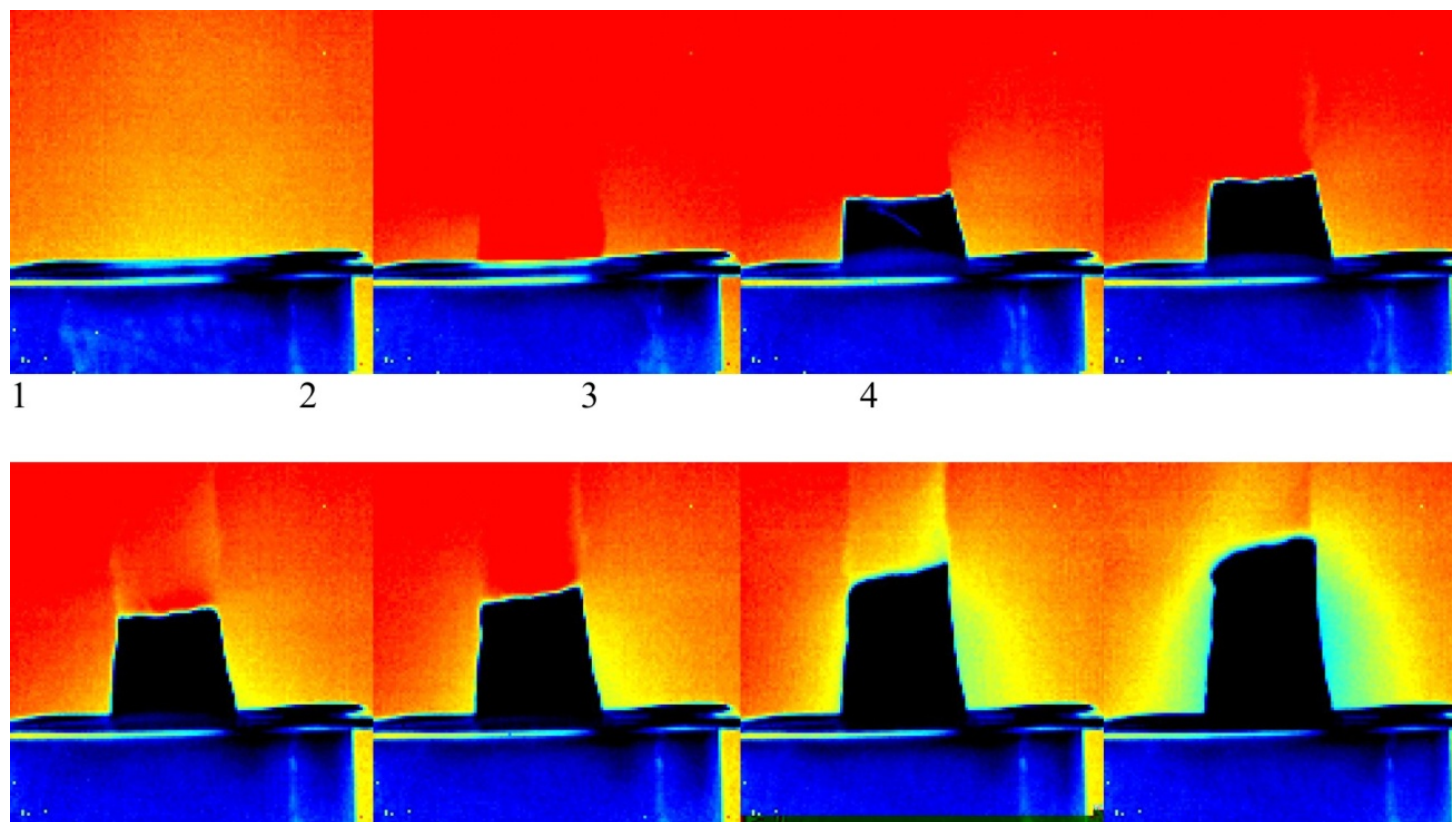
# Применение термографа для исследования нагрева металлической киноформной линзы на стеклотекстолите ТГц излучением (динамика нагрева)



## Эксперимент по исследованию тепловых волн, возникающих при смачивании водой ткани (экспериментальная установка)



# Применение термографа для исследования тепловых волн, возникающих при смачивании водой ткани (кадры из терагерцового видео)



# Неохлаждаемый матричный микроболометрический приемник



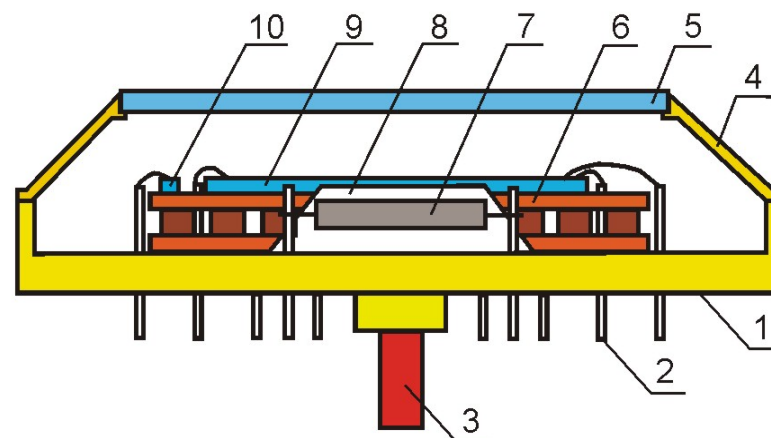
**Два образца ММБП  
(ИФП СО РАН)**

160x120 pixels (f up to 90 fps )

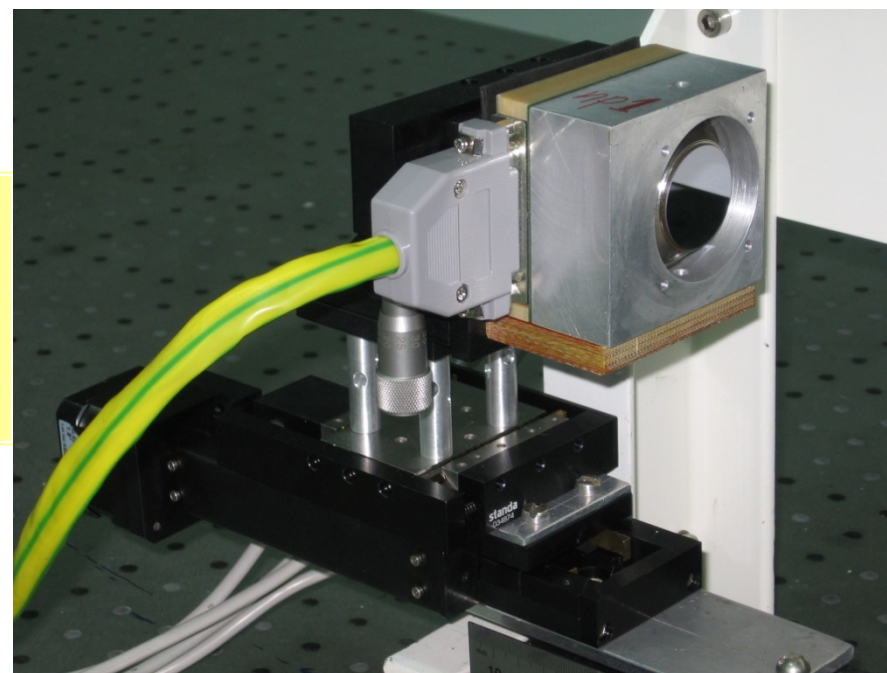
320x240 pixels (f up to 40 fps )

Pixel size – 51x51  $\mu\text{m}$

Physical size – 12x8 and 16x12 mm



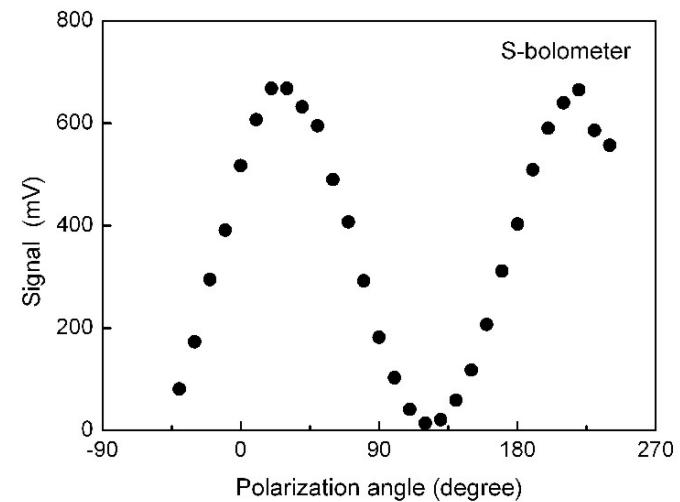
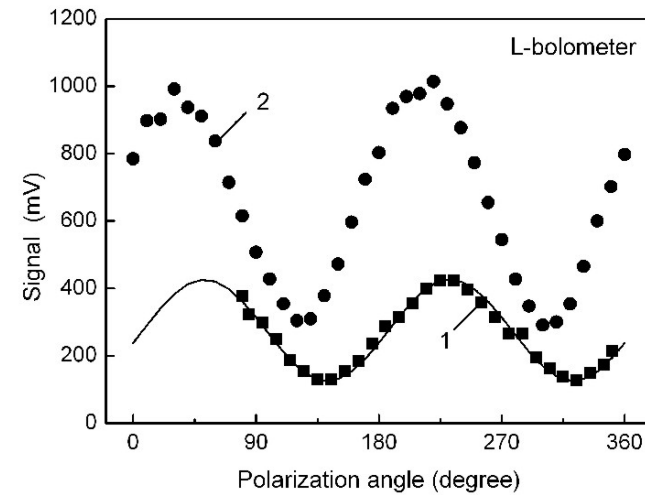
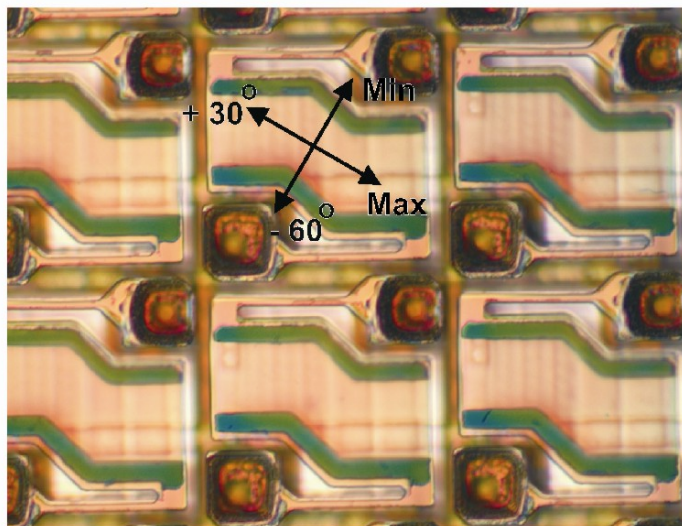
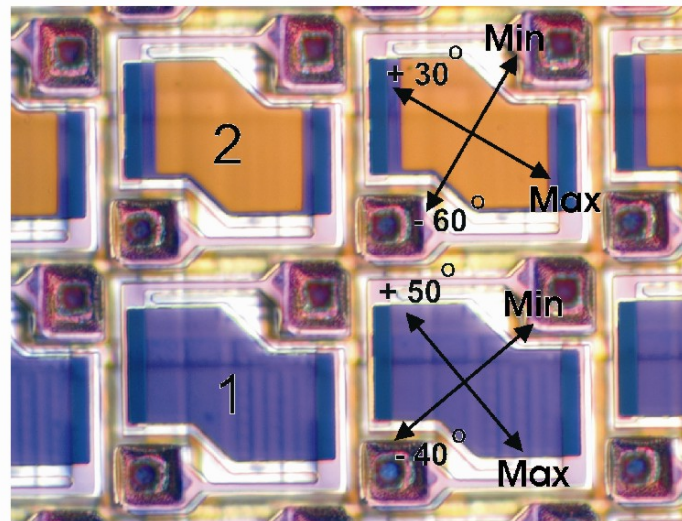
**Схема устройства ММБП**



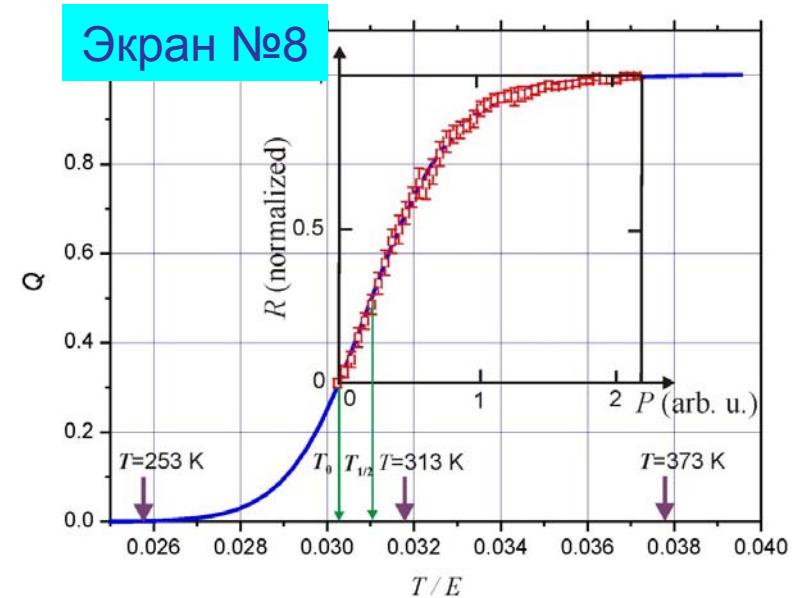
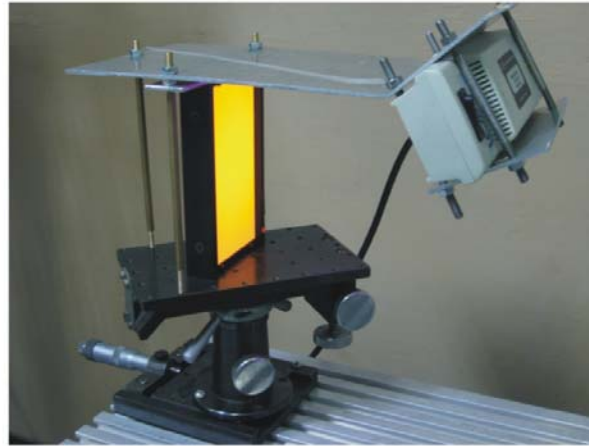
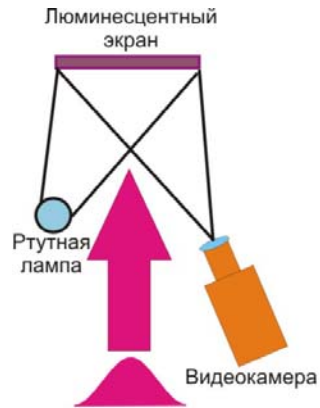
*M.A. Dem'yanenko, D.G. Esaev, B.A. Knyazev,  
G.N. Kulipanov, N.A. Vinokurov. Appl. Phys. Lett.,  
V. 92, 131116, 2008.*



# Поляризационная чувствительность матричного микроболометрического приемника



# Термочувствительный люминесцентный экран - ТЧЛЭ (Macken Instruments, Inc.)



Восемь экранов. Размер: 76x76 мм.  
Принцип действия: температурное тушение люминесценции

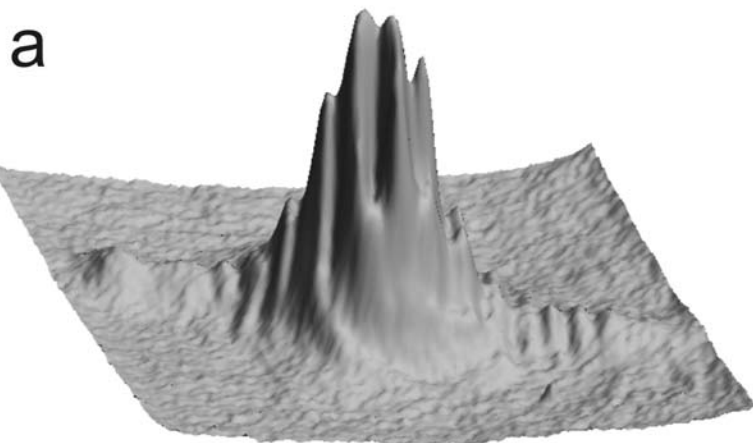
«Отклик» экрана остается линейным вплоть до 50%-го тушения люминесценции

Теоретический волновой предел при  $\lambda = 130$  мкм равен **7 линий/мм**

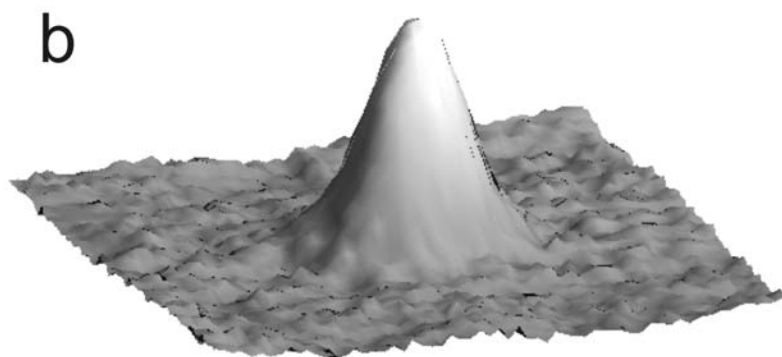
Номер экрана	1	2	3	4	5	6	7	8
Постоянная времени (сек)	0.03	0.03	0.03	0.03	0.06	0.15	0.2	1.0
Пространственное разрешение (лин/мм)	12	12	12	8	4	2	4	0.64

*B.A. Knyazev, V.V. Kubarev. "Real-time wide-field imaging using a tunable terahertz free electron laser and a thermal image plate". Infrared Physics and Technology, V. 52, 14, 2009.*

## ТЧЛЭ: измерение распределения интенсивности терагерцового пучка ЛСЭ

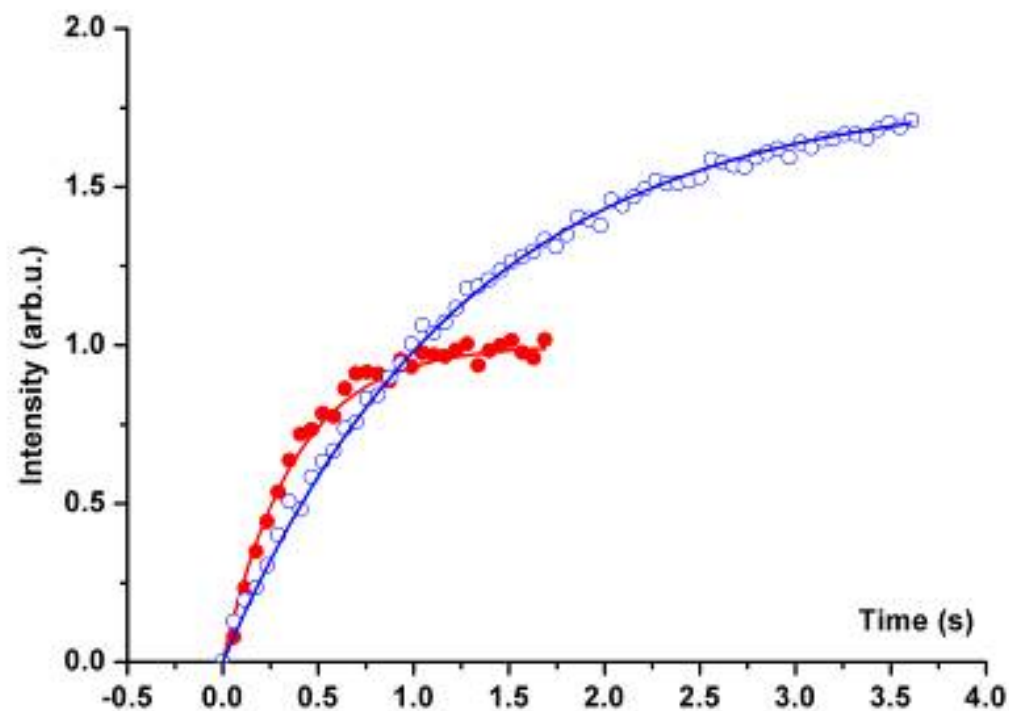


Пучок со следами  
дифракционной картины



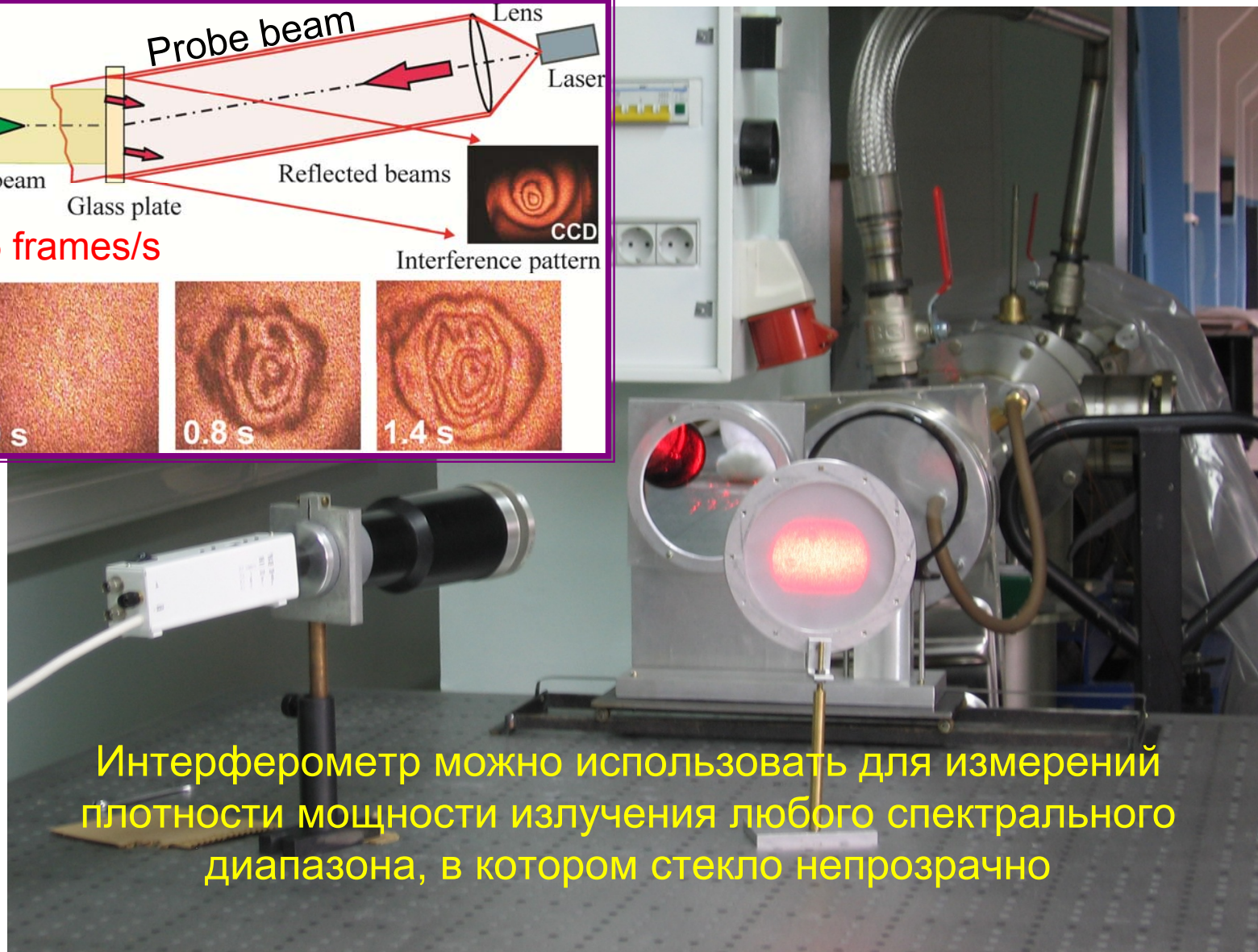
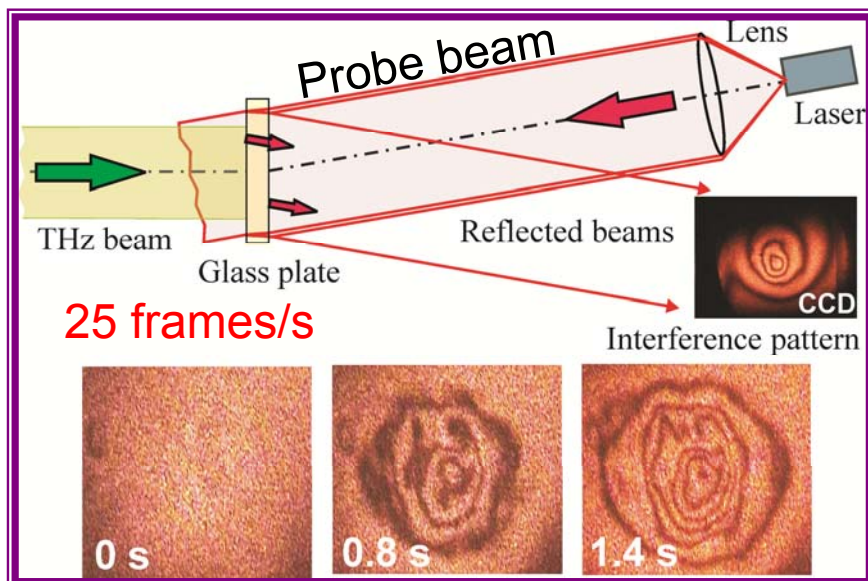
Тот же пучок после оптической  
фильтрации с помощью линзы и  
диафрагмы

# Термочувствительный люминесцентный экран – временное разрешение



Отклик термочувствительного  
экрана #7 (сплошные кружочки) и  
экрана #8 (открытые кружочки) на  
воздействие терагерцового  
излучения в зависимости от

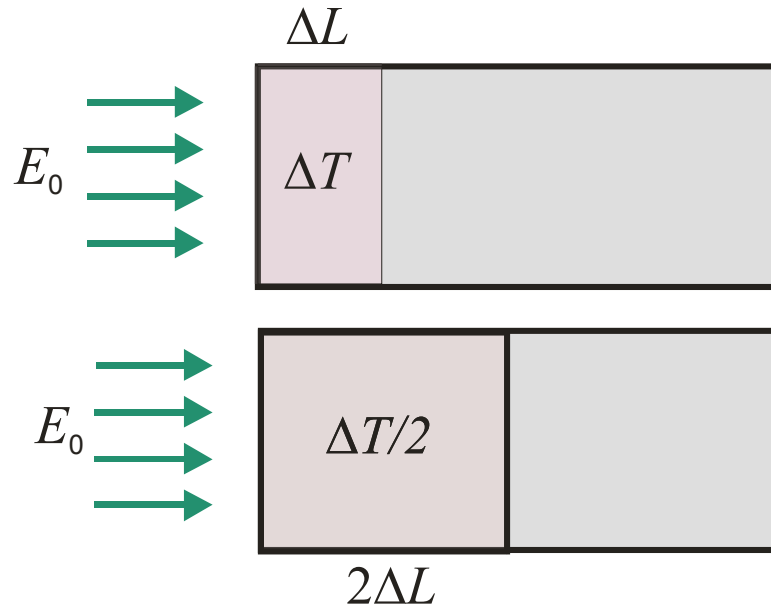
# Термочувствительный интерферометр (ТЧИ) как абсолютный измеритель плотности мощности излучения



Интерферометр можно использовать для измерений плотности мощности излучения любого спектрального диапазона, в котором стекло непрозрачно

# Почему ТЧИ является способен измерять абсолютную мощность излучения

Ответ: Он измеряет не температуру, а удельную плотность энергии, поглощенную в тонком слое стекла



$$dS = 2n(T(l,t)) dl$$

$$\delta(dS(t)) = 2[\beta + \alpha n] \cdot [\delta T(l,t) \cdot dl]$$

Material parameters:

$$\sim E_0$$

$$\beta = \frac{\partial n}{\partial T}; \quad \alpha = \frac{1}{dl} \frac{\partial(dl)}{\partial T}$$

$$T_{\text{surf}}^{(a)} \neq T_{\text{surf}}^{(b)}; \Delta L = ?$$

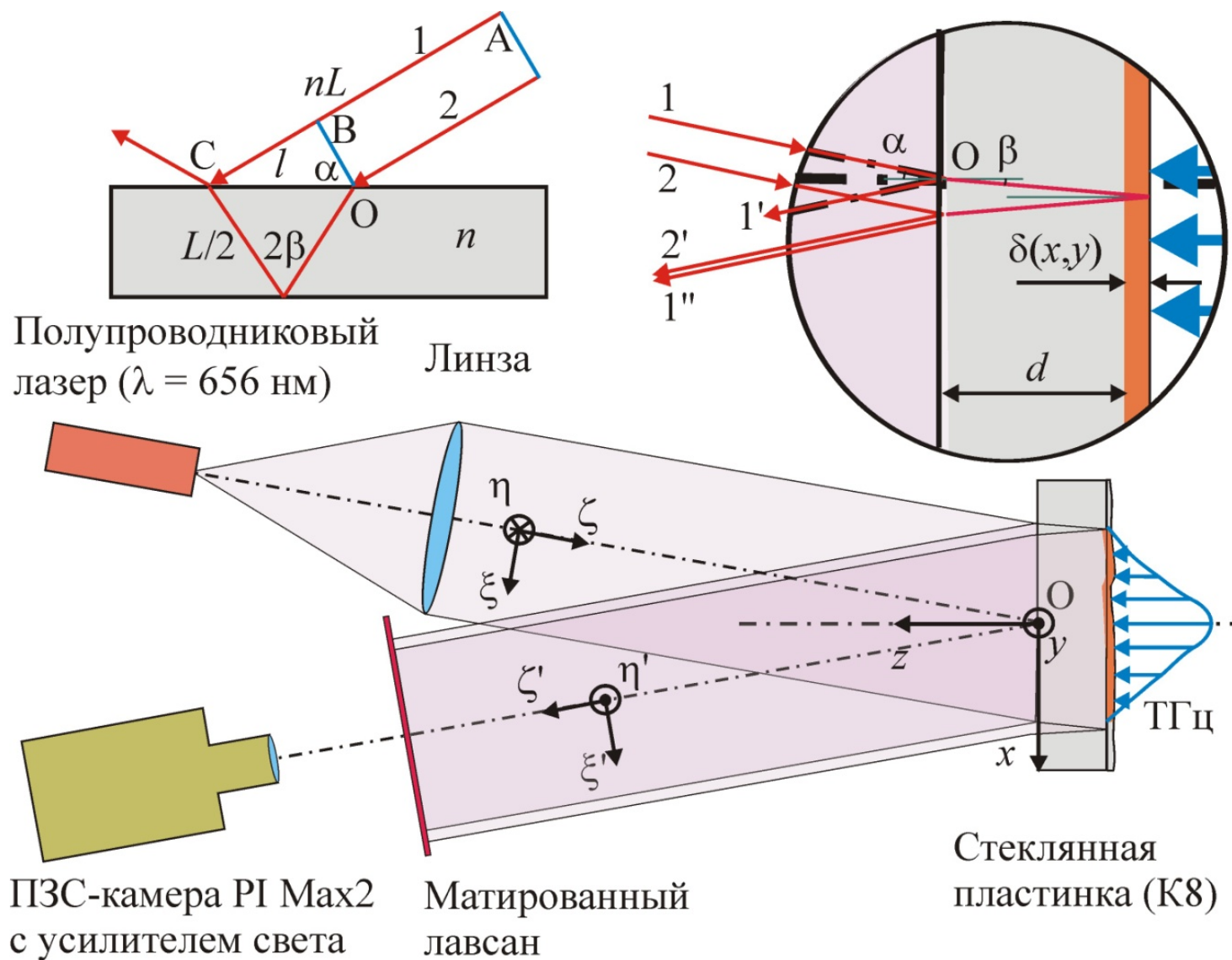
$$\Delta L \cdot \Delta T = (2\Delta L) \cdot (\Delta T / 2) \sim E_0$$

**Radiation power density:**

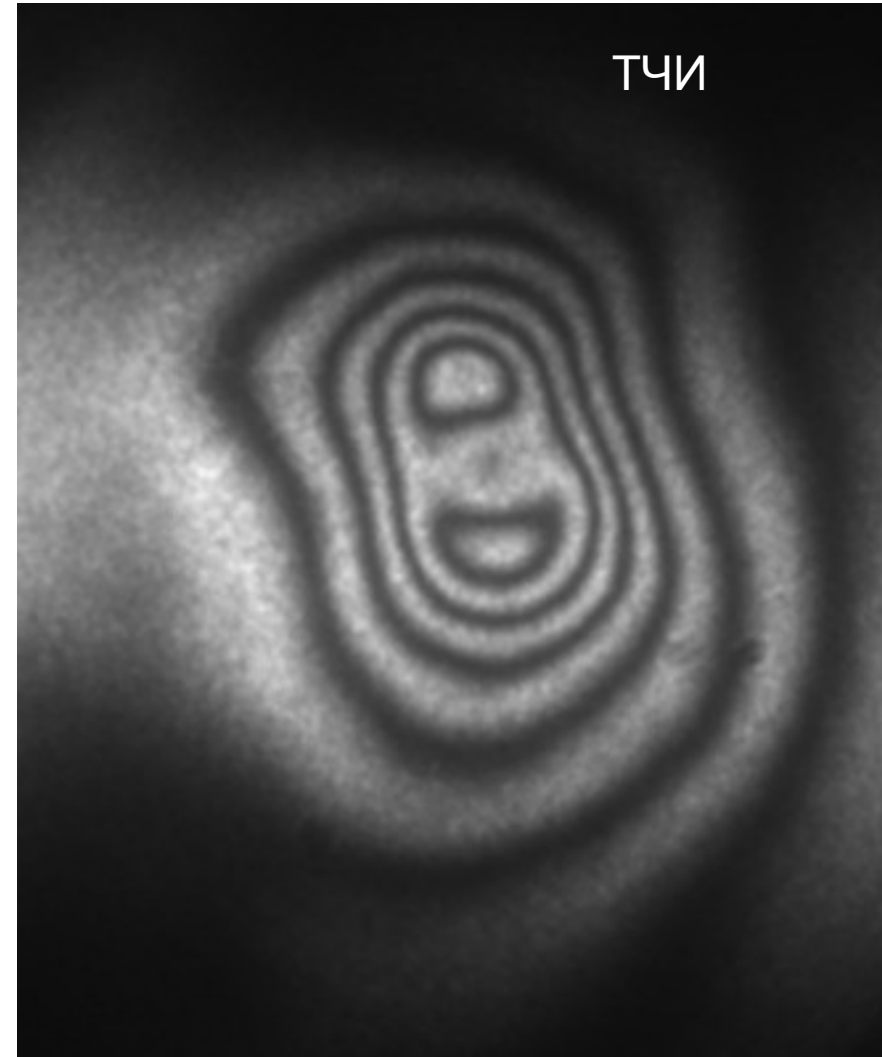
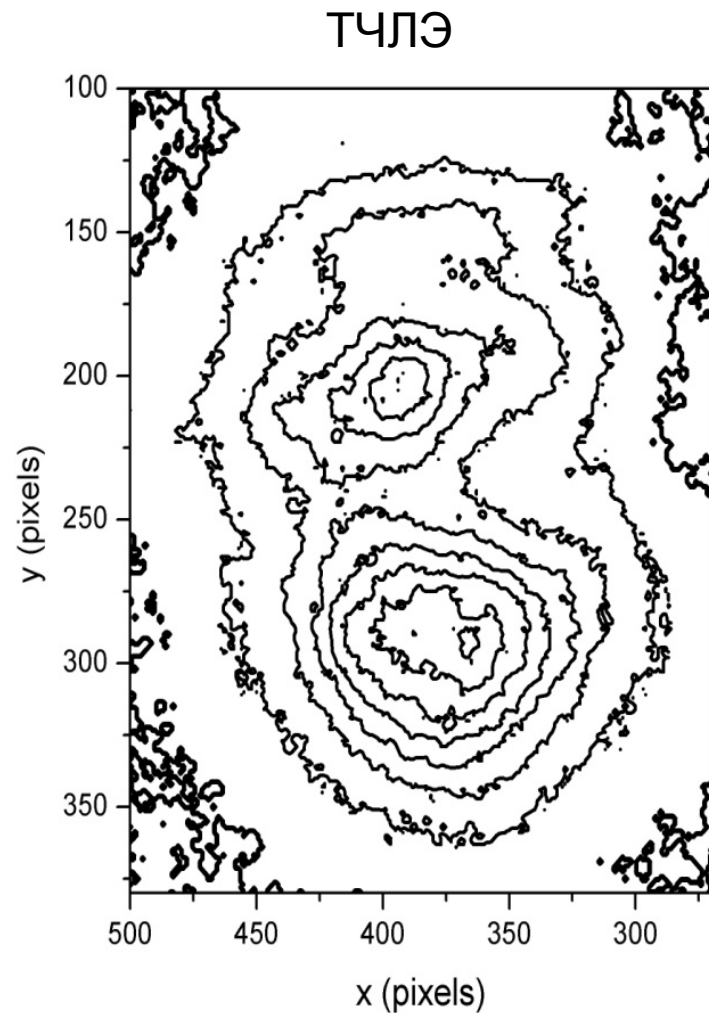
$$P(x, y) = K \cdot \frac{\delta N(x, y)}{\delta t}; \quad K = \frac{\lambda_0 \rho c_p}{2(\beta + \alpha n)}; \quad K_{K8} = 5.1 \text{ J/cm}^2 \text{ per fringe}$$

Because of reflection of a portion of the terahertz beam the result has to be corrected. For the wavelength of 130  $\mu\text{m}$  and K8 glass reflection coefficient is about 10%.

# Схема, поясняющая принцип измерений ТЧИ

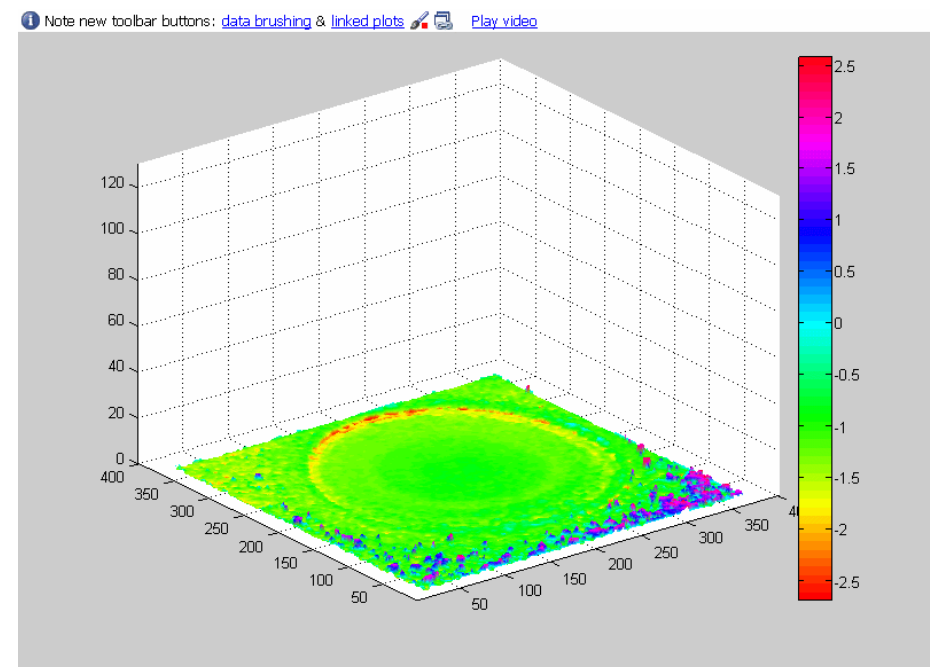
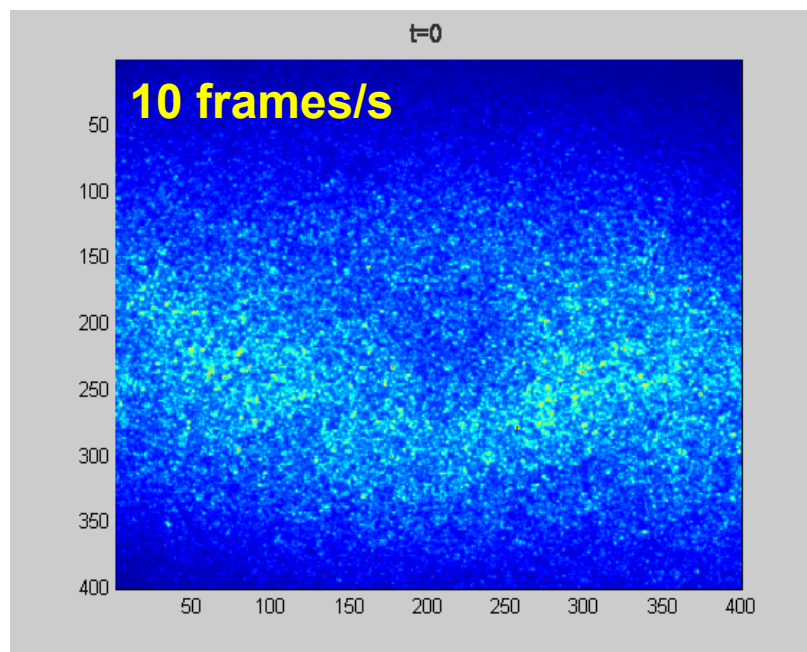


# Еще один пример измерений сложного распределения плотности мощности с помощью ТЧИ и ТЧЛЭ





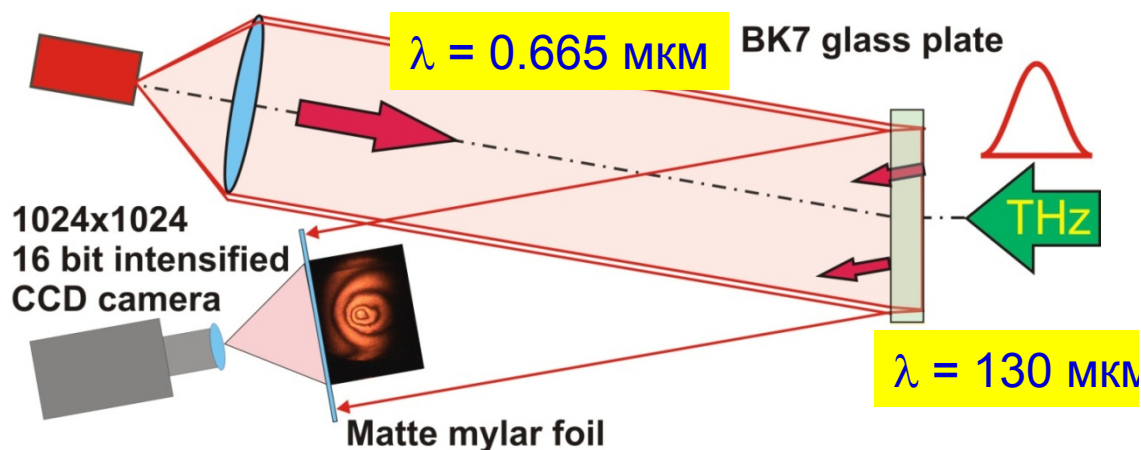
# Измерение мощности пучка ЛСЭ с помощью ТЧИ



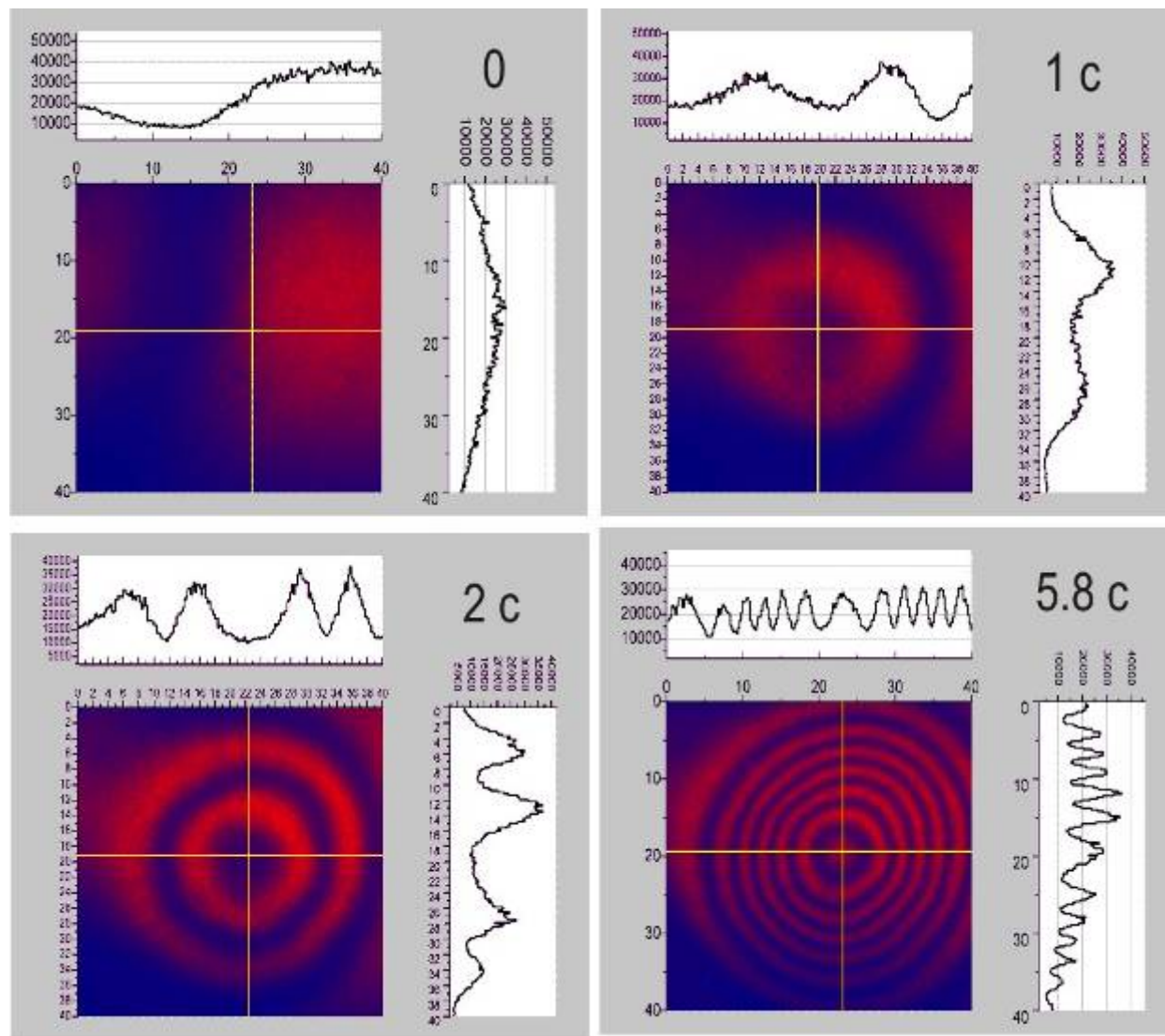
Лазерный пучок на рабочей станции СПИН имеет гауссов профиль с  $w = 9$  мм

Чувствительность ТЧЛЭ  $5.1$  Дж/см<sup>2</sup> на полосу интерференции

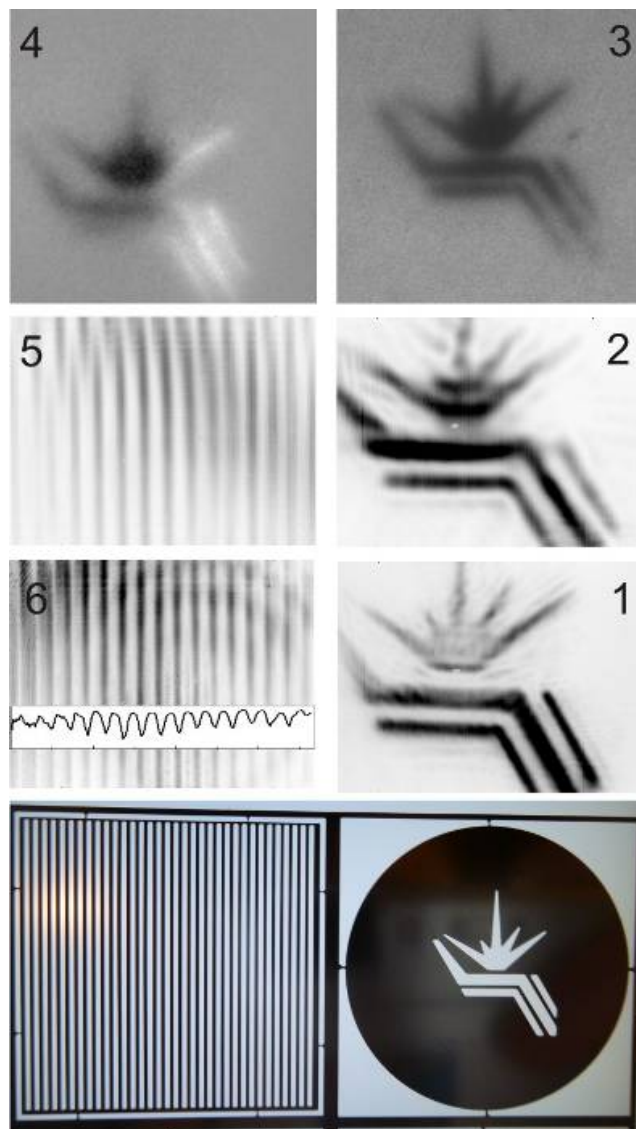
Semiconductor laser



# Измерение мощности пучка ЛСЭ с помощью ТЧИ (четыре кадра из терагерцового видеофильма)

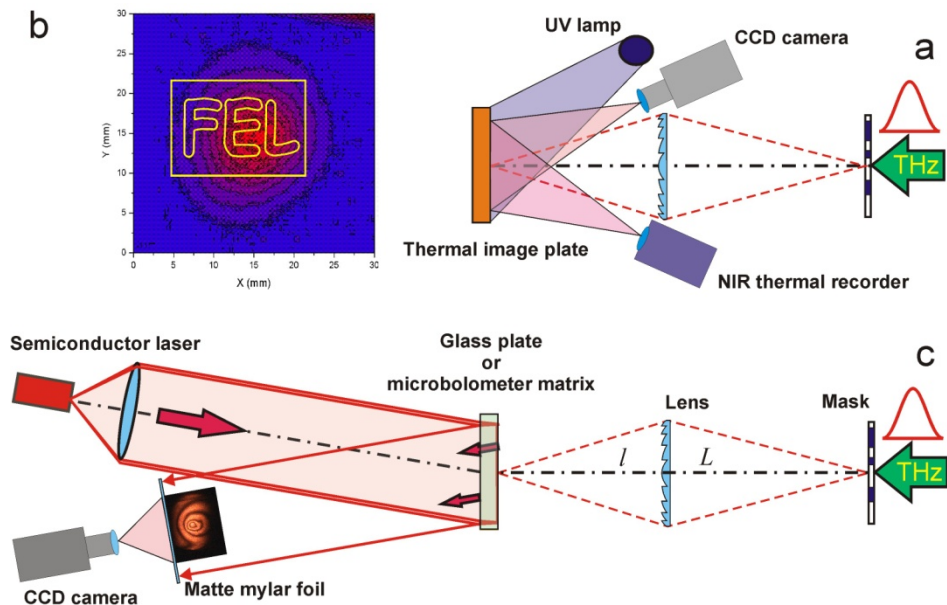


# Сравнение изображений, полученных разными изображающими системами

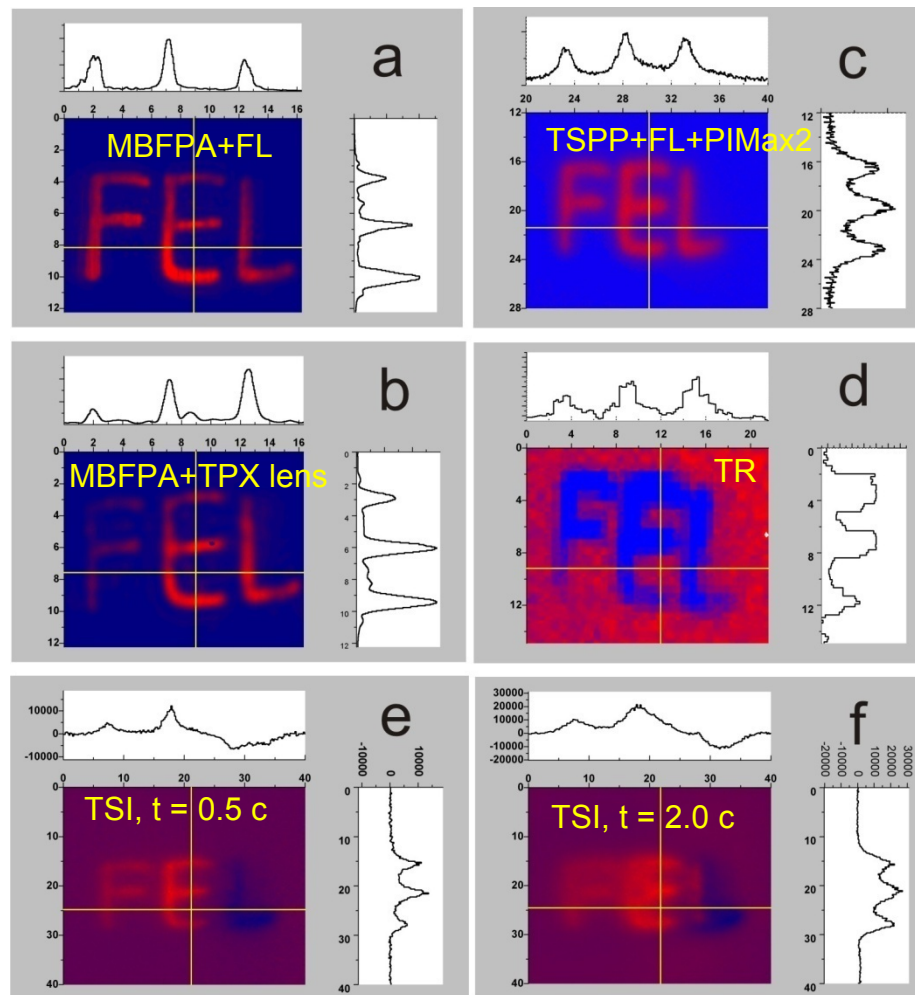


Изображения  
решетки Рончи  
(период 1 мм,  
ширина щели  
0,522 мм) и маски с  
эмблемой  
института  
ядерной физики,  
записанные с  
помощью  
матричного  
микроболометрич  
еского  
приемника (1, 2, 5, 6).  
Остальные  
изображения  
были записаны с

# Сравнение изображений, полученных разными изображающими системами



The best spatial resolution was about 0.3 mm for the wavelength of 0.13 mm



	TR	TSI	MBFPA	TSPP	
				Plate #7	Plate #8
$\Delta x$ (mm)	2	0.3	0.25	1	2
$\Delta t$ (s)	DS	0.02	0.02	0.2	1.3
S	High	Medium	Very high	Very low	Low
f (fps)	25	10 - 50	10 - 50	4	1

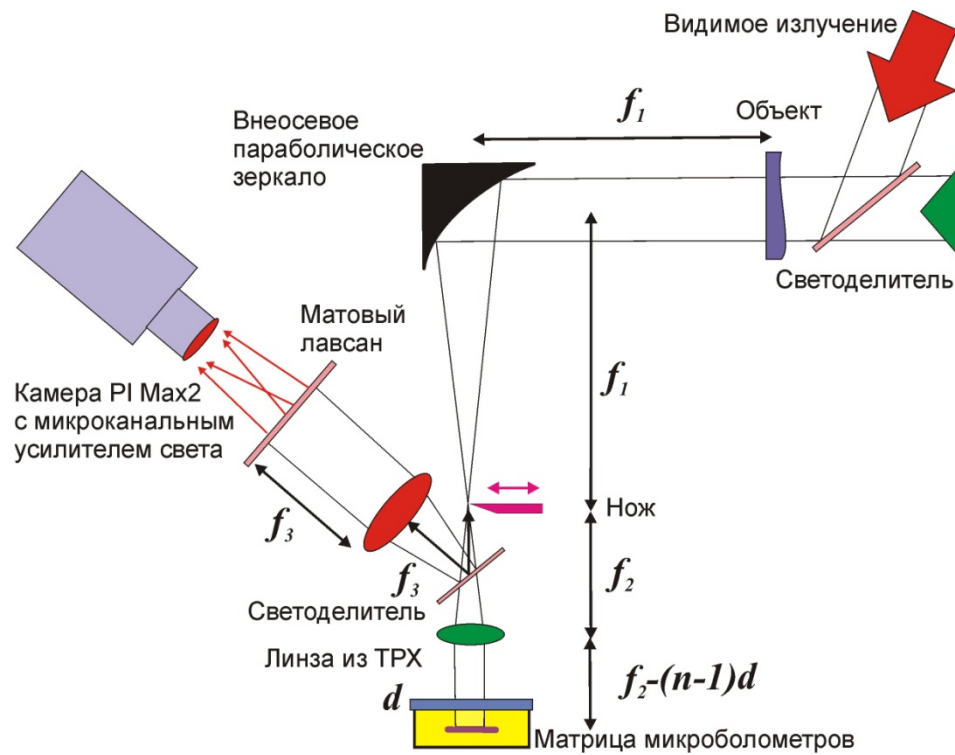
# Терагерцовое излучение для метрологии

- Спекл-метрология
- Изображающие системы

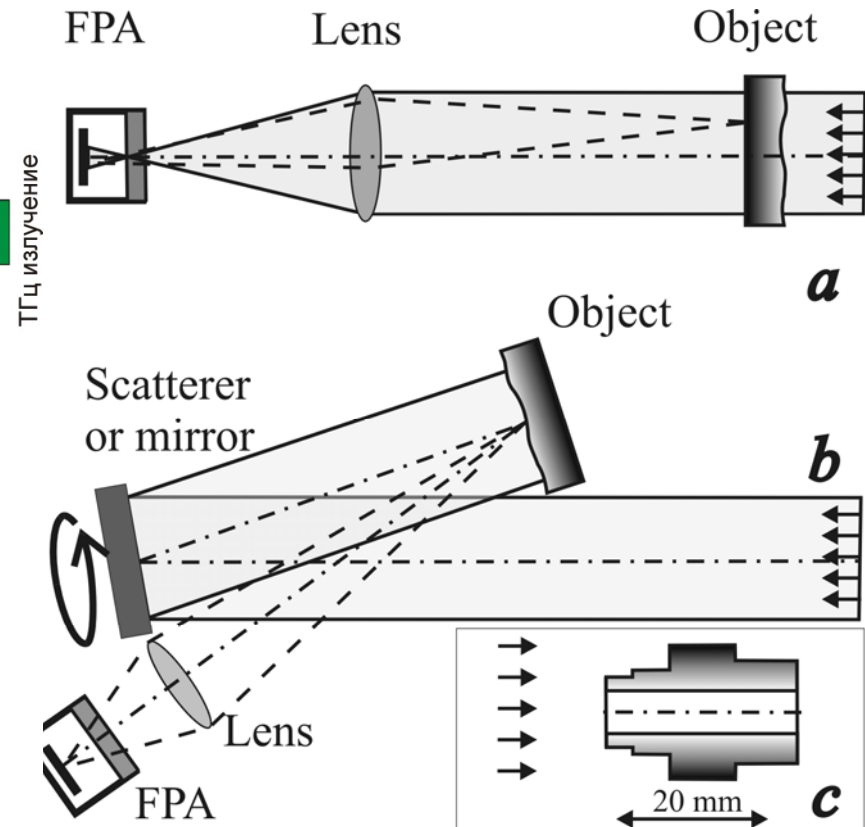


# *Получение ТГц изображений Спеклы*

# Абсорбционная спектроскопия, изображающая радиоскопия, исследование внутренних неоднородностей, спекл-метрология

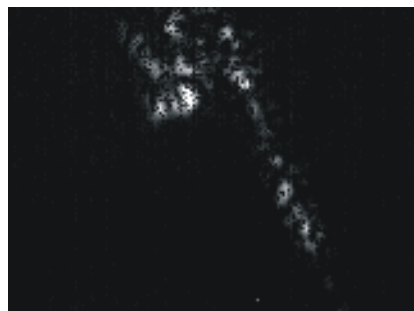


Система для одновременного исследования неоднородностей в видимом и терагерцовом диапазонах

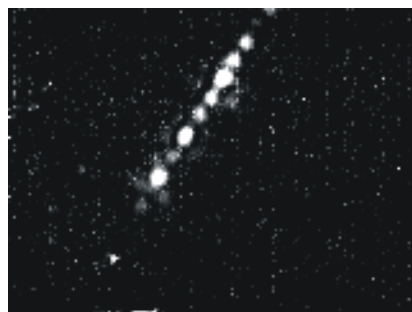


Радиоскопия, исследование поверхностей, регистрация перемещения объектов

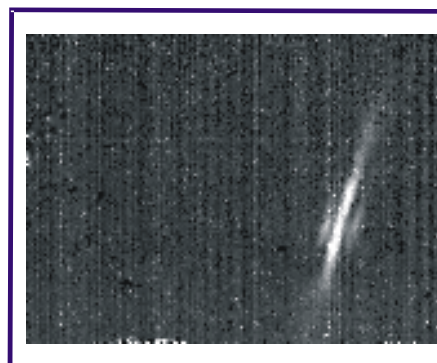
## Два режима освещения лазерным пучком: направленный луч или рассеиватель



**Ключ,  
рассеиватель**

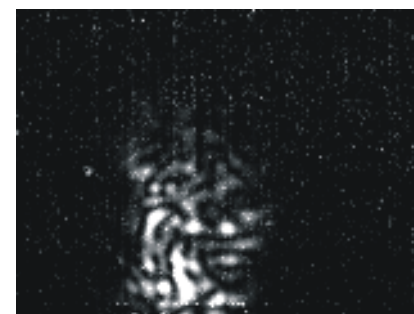
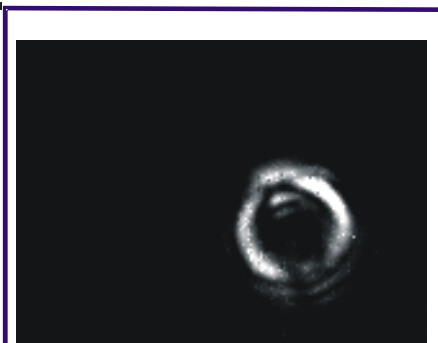
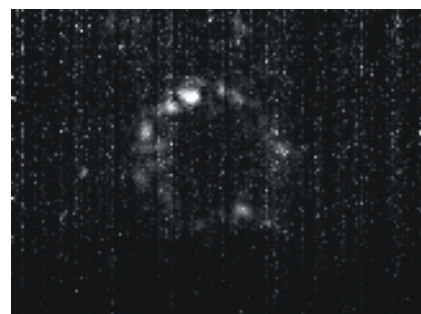


**Отвертка,  
рассеиватель**



**Отвертка,  
режим отражения**

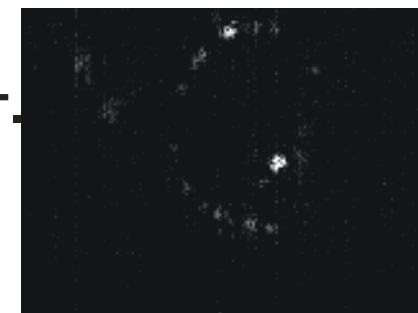
**Гайка, рассеив.**



**Проволочная  
спираль,  
рассеиватель**

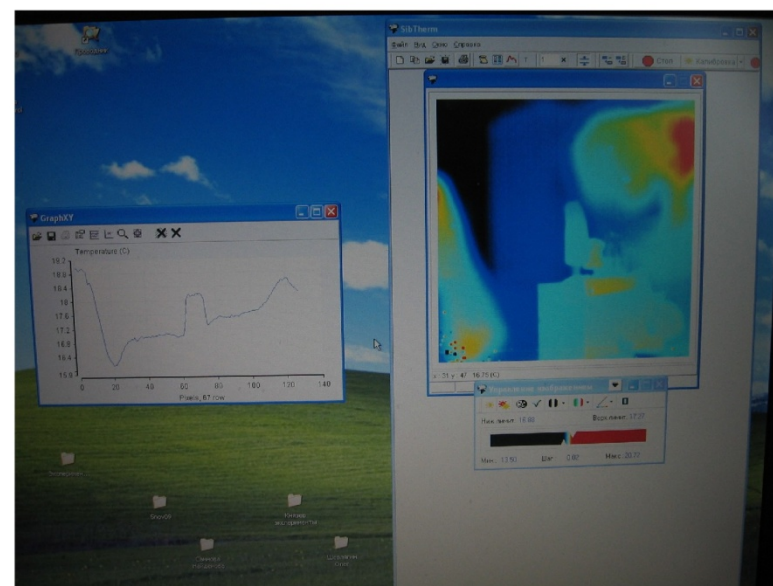
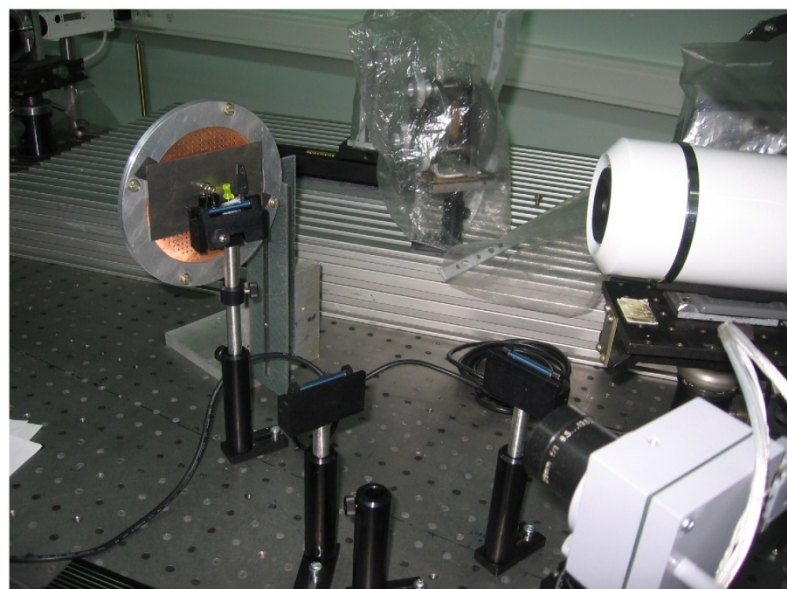
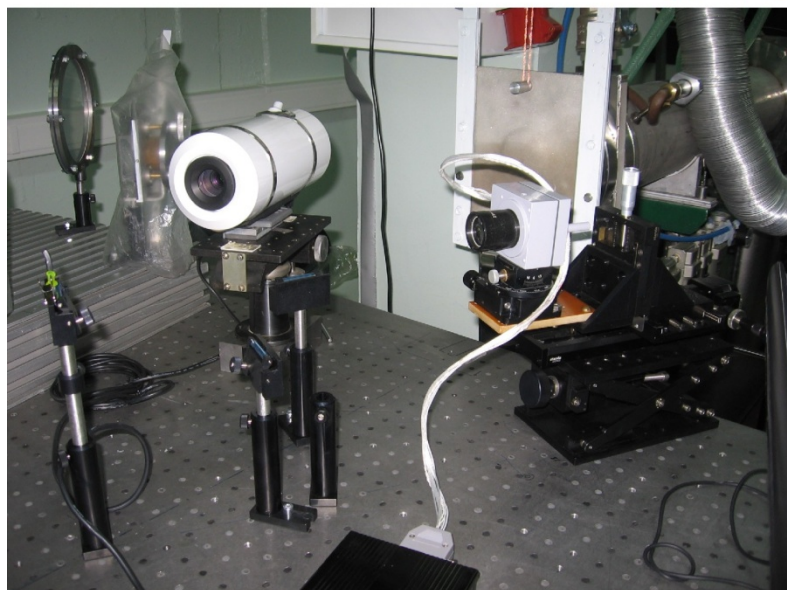
**стекло, рассеиват.**

**Гайка,  
режим  
отражения**





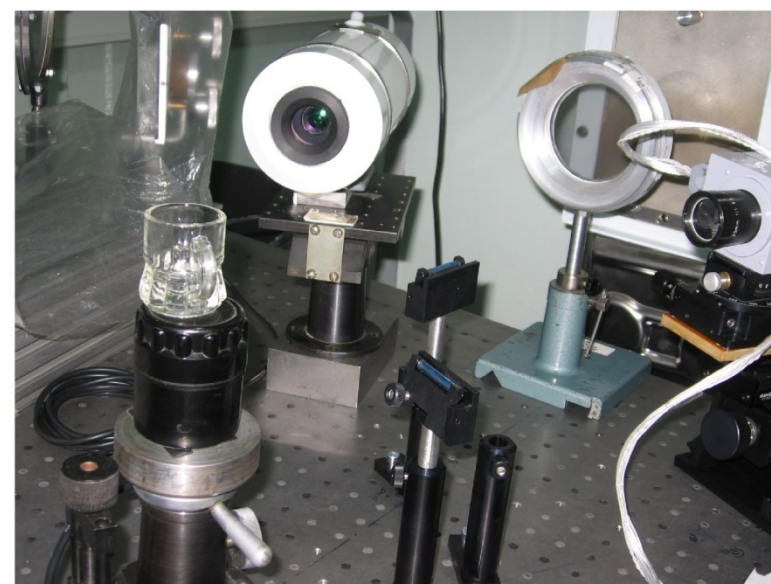
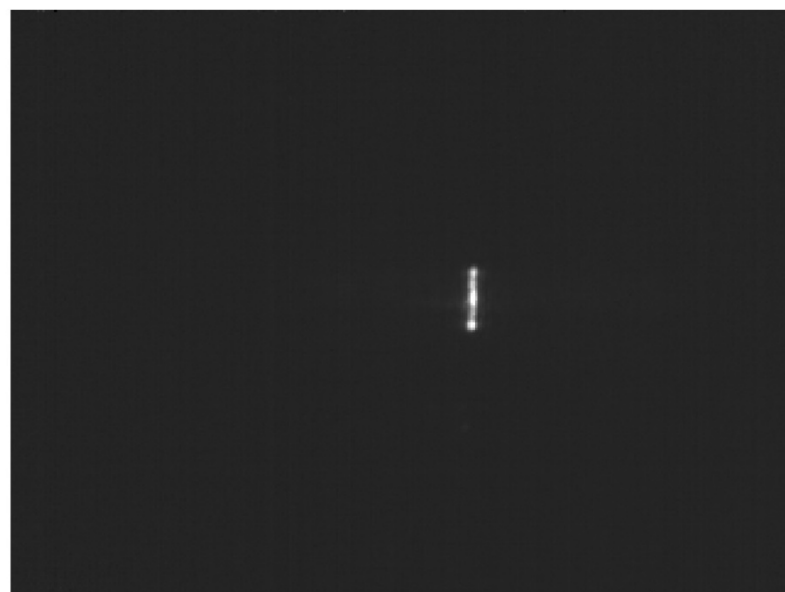
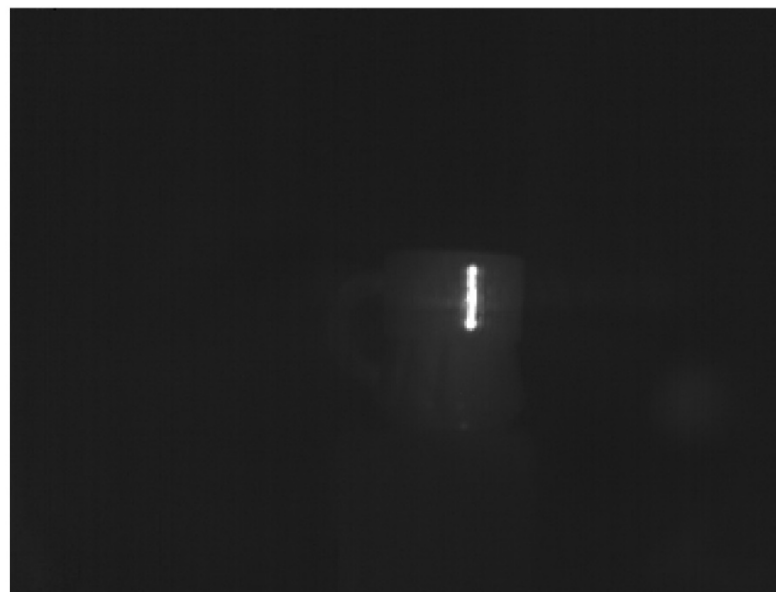
# Получение изображений матрицей микроболометров и тепловизором



# Получение изображений матрицей микроболометров: Петушок из оникса



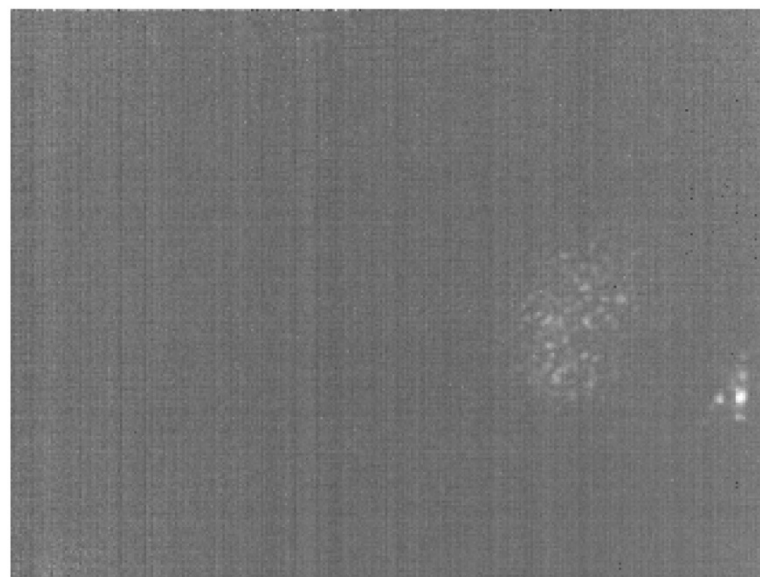
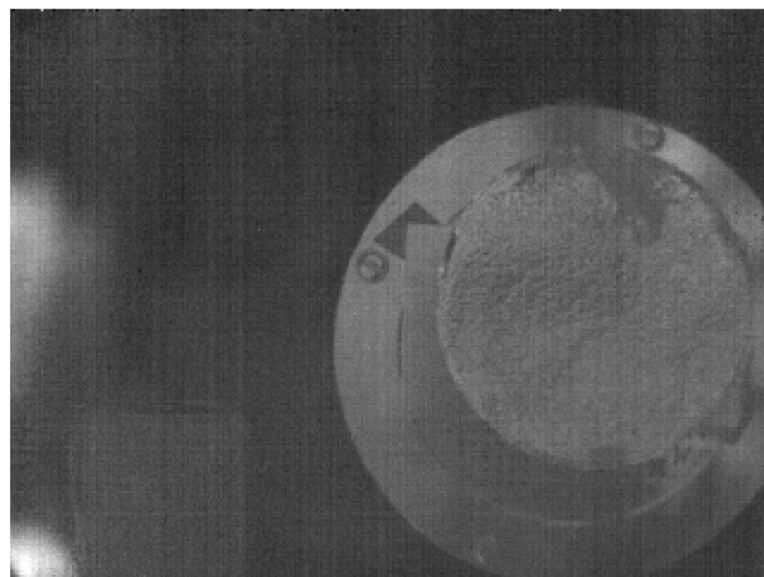
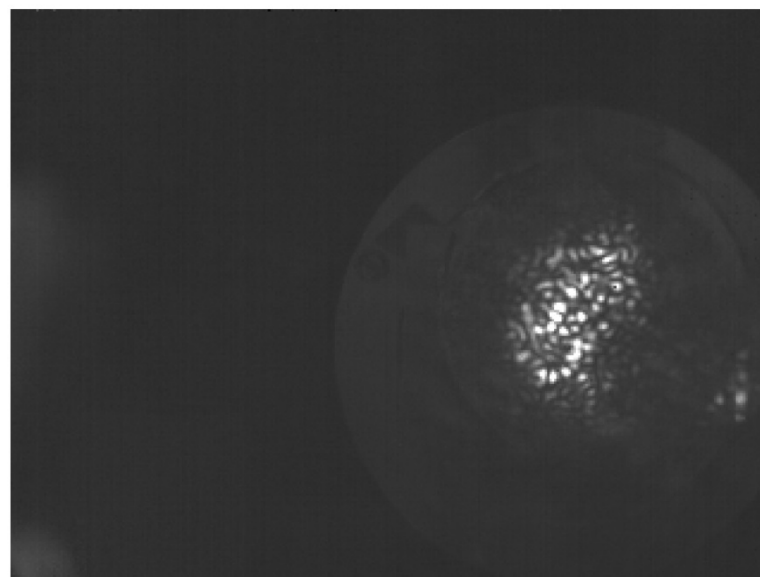
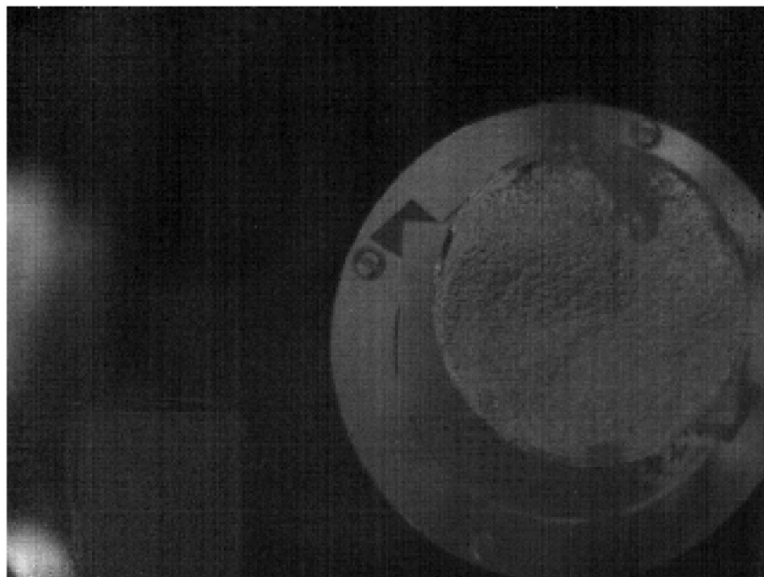
# Получение изображений матрицей микроболометров: Стеклянный бокальчик



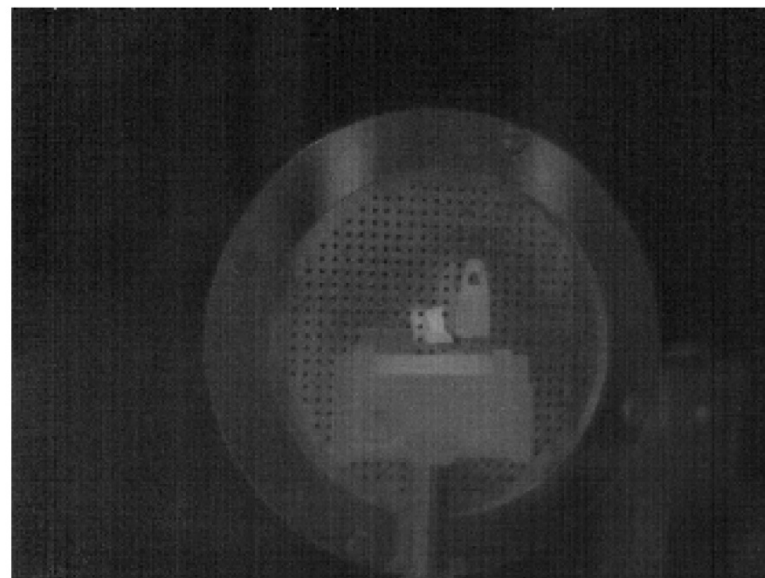
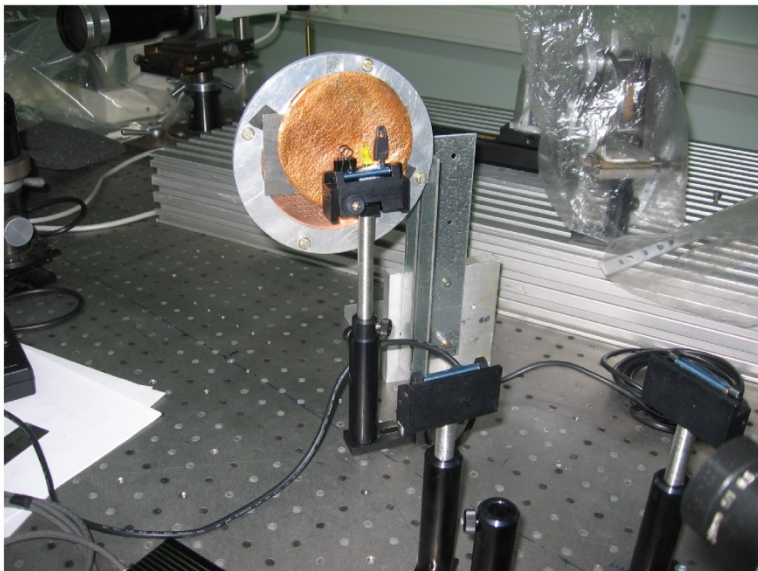
## Получение изображений матрицей микроболометров: Глиняный дракон и металлический слон



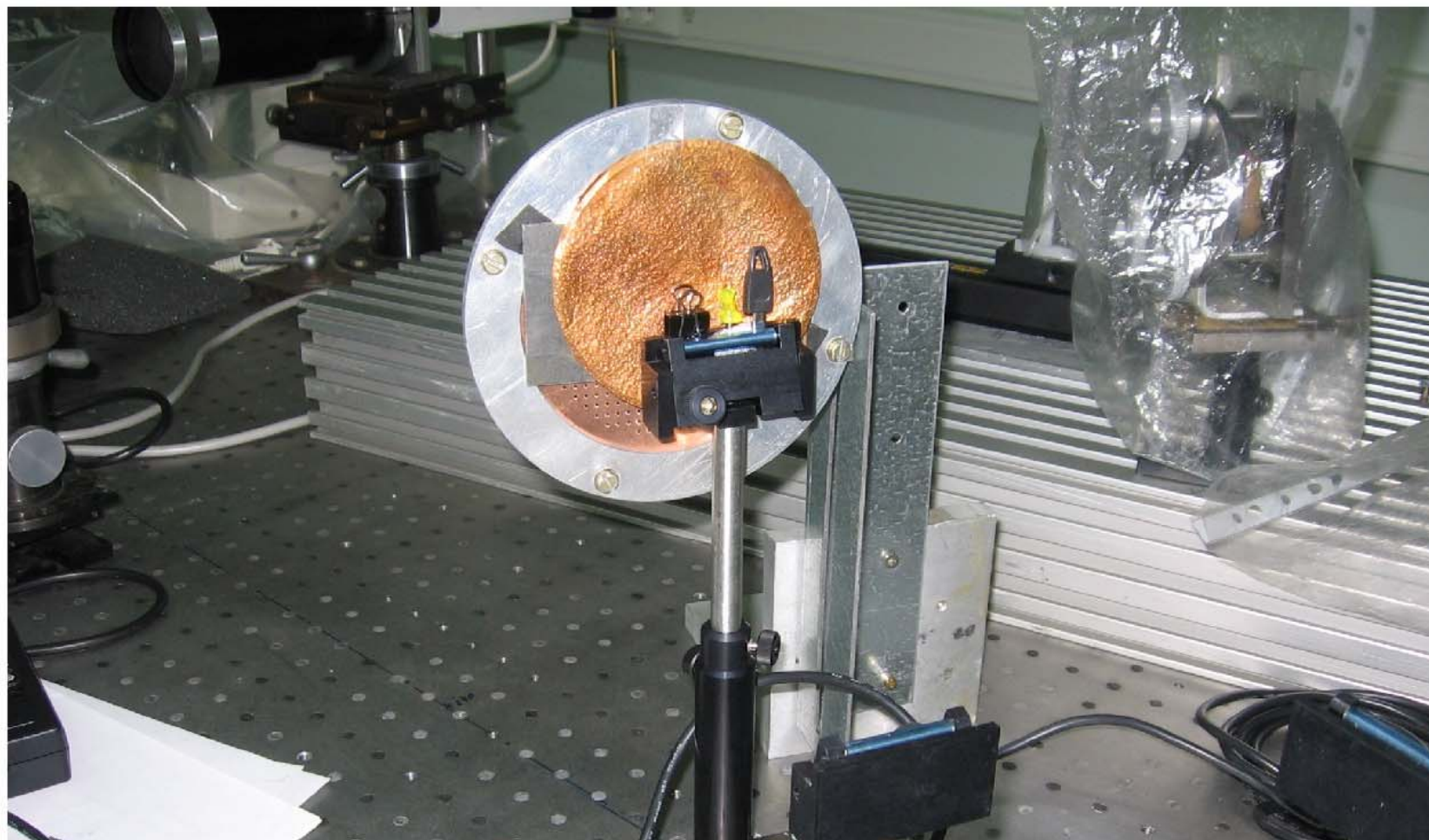
# Получение изображений матрицей микроболометров: Медный рассеиватель



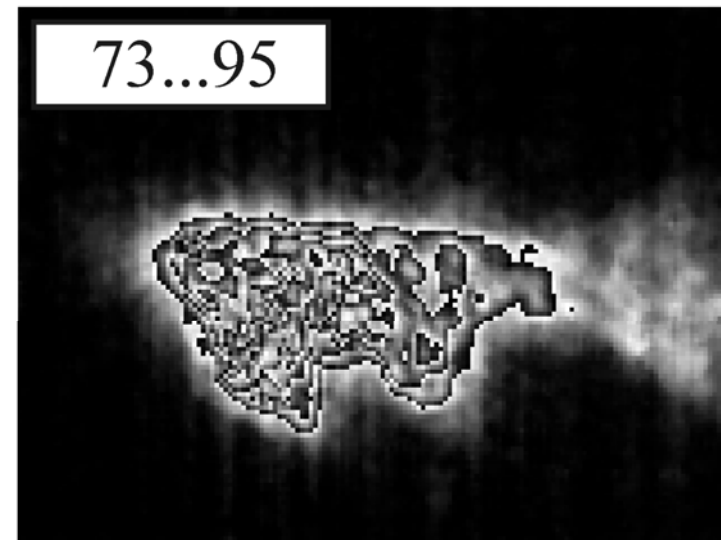
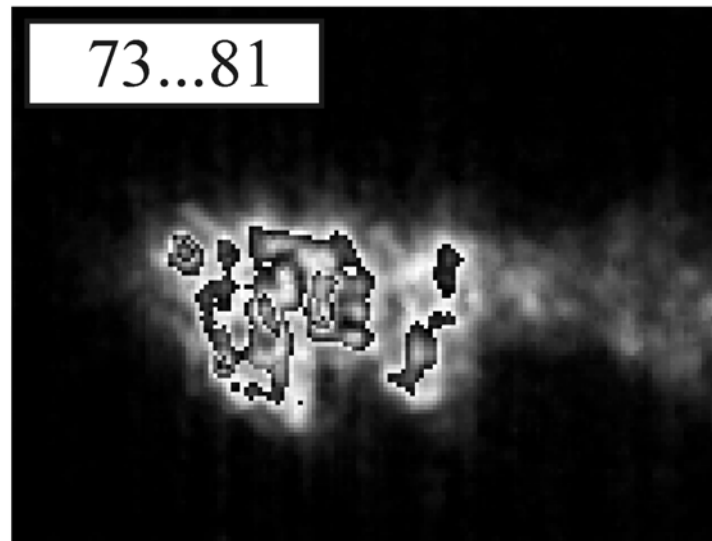
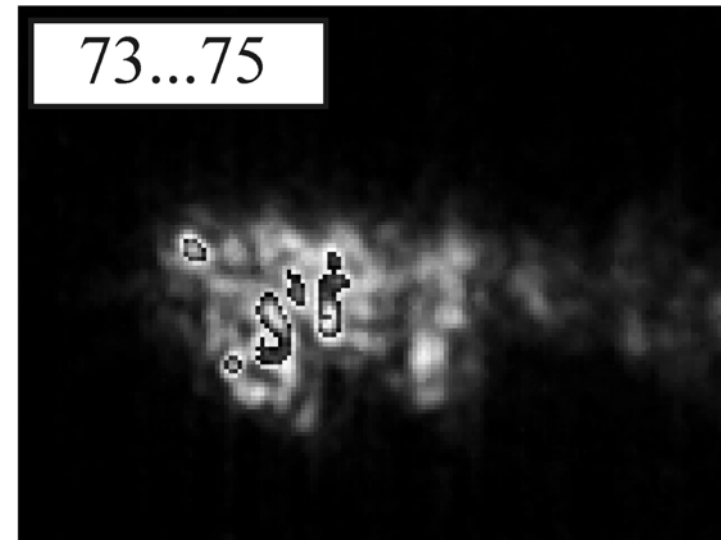
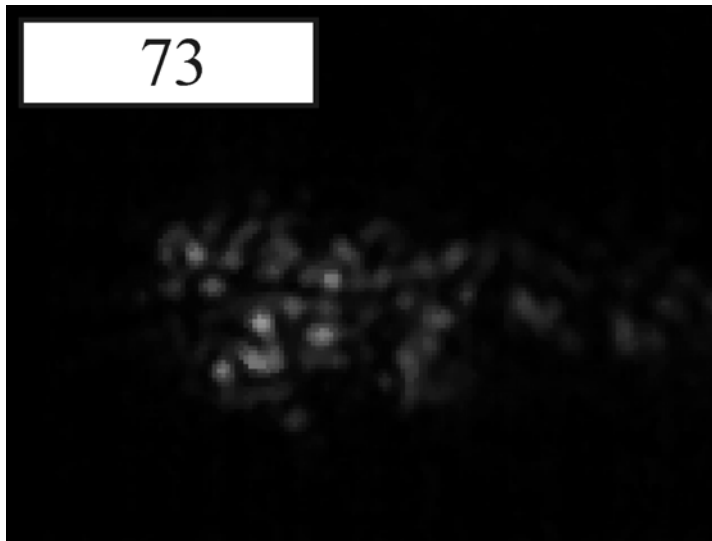
# Получение изображений матрицей микроболометров: Образцы на фоне металлической сетки



# Получение изображений Образцы на фоне

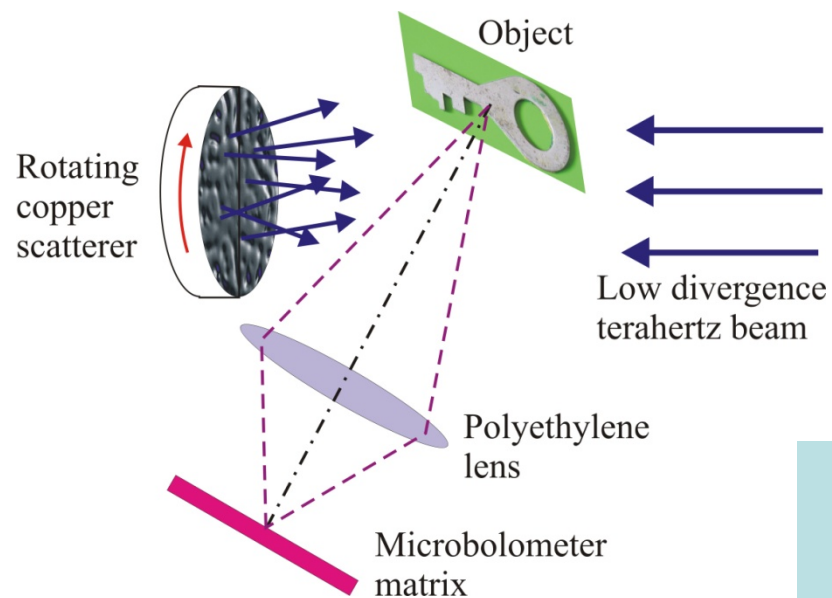


# Наложение кадров при вращающемся рассеивателе улучшают изображение ( $f_{eff} = 2$ кадра/с)

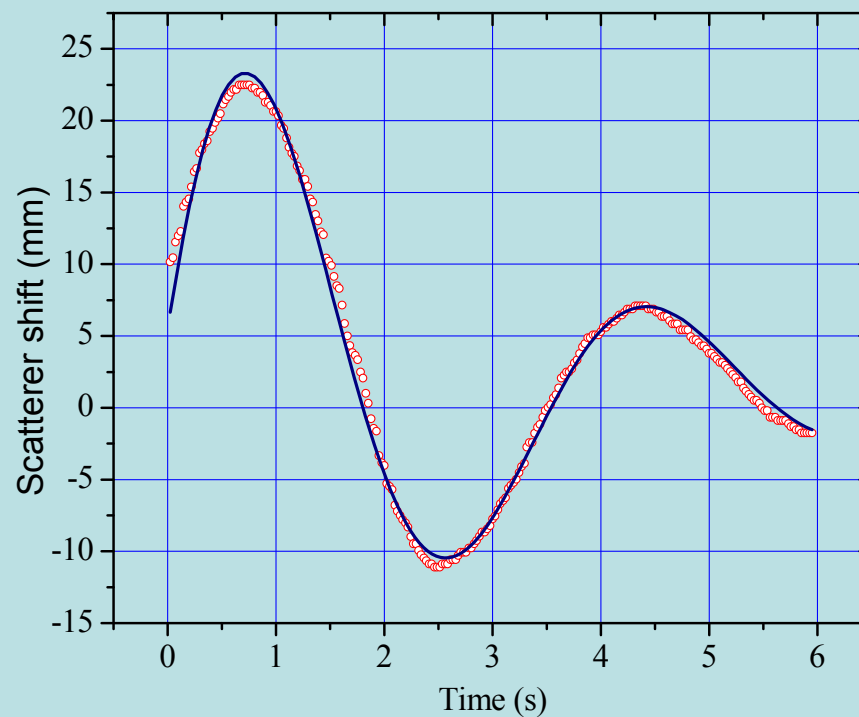
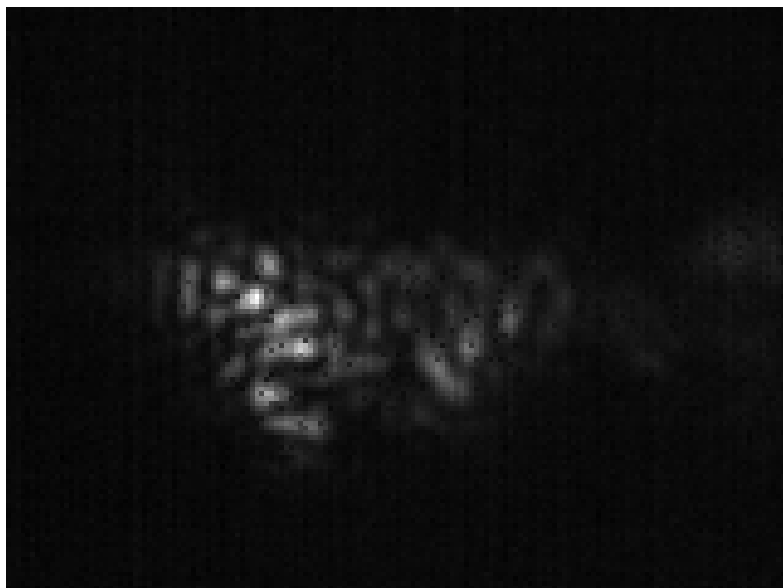




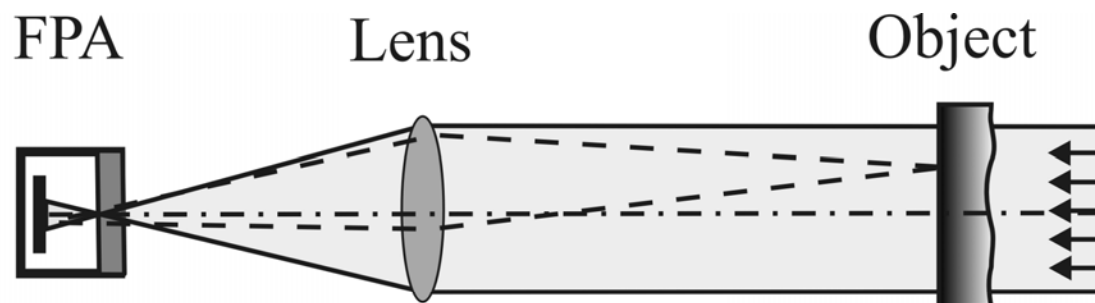
# Пример терагерцовой спекл-фотографии



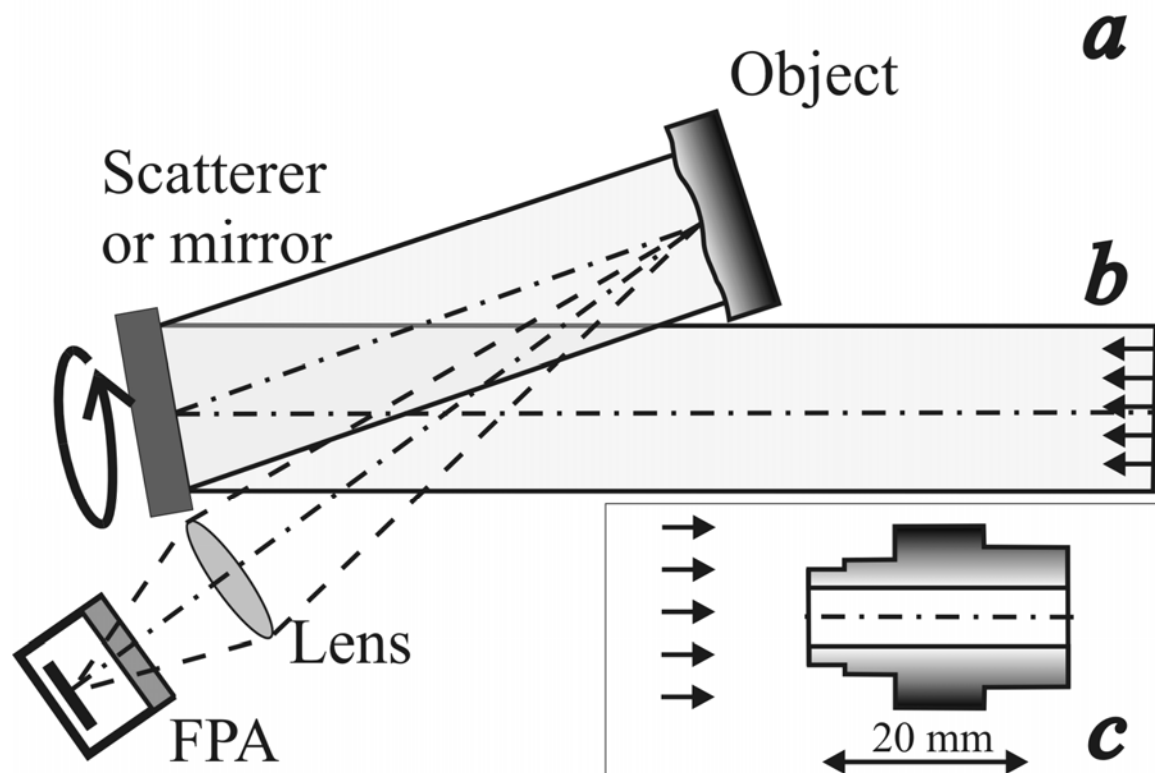
- Цифровая голография
- Электронная спекл-интерферометрия
- Исследование потоков жидкости
- Исследование динамики поверхности



# Радиоскопия и визуализация объектов освещаемых когерентным монохроматическим излучением ЛСЭ

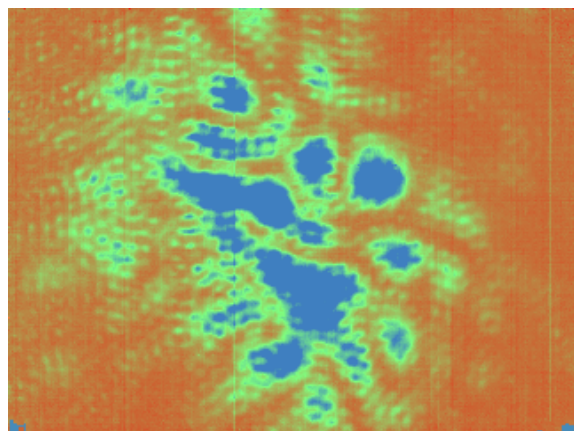


Режим интроскопии  
(T-ray radioscopy)

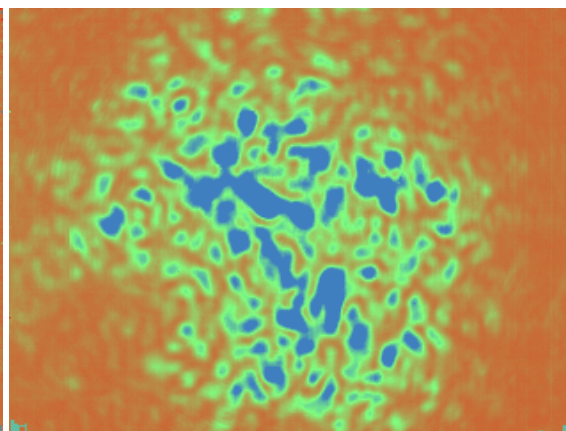


Режим освещения  
объектов  
(Fresnel reflection/  
Scattering)

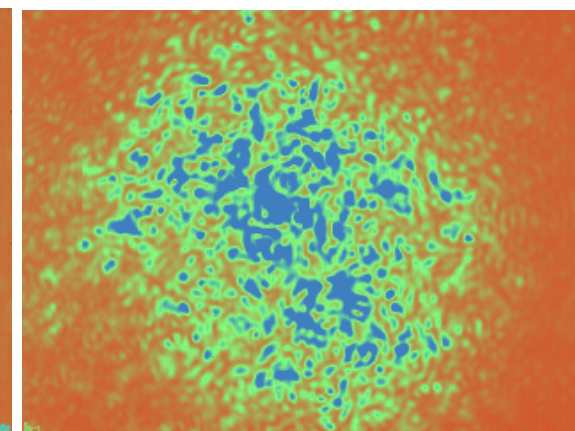
Размер субъективных спеклов: изображения  
получены с помощью френелевских линз  
диафрагмами  $D$



$D = 15$  мм

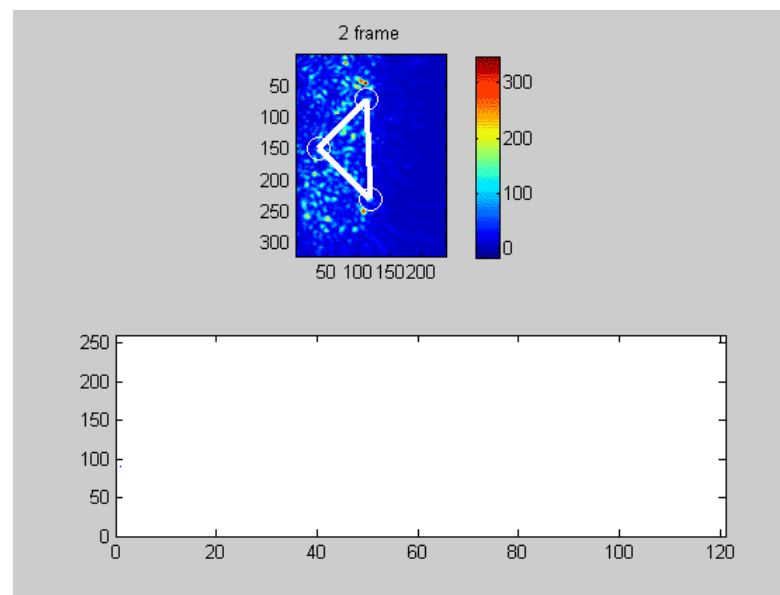
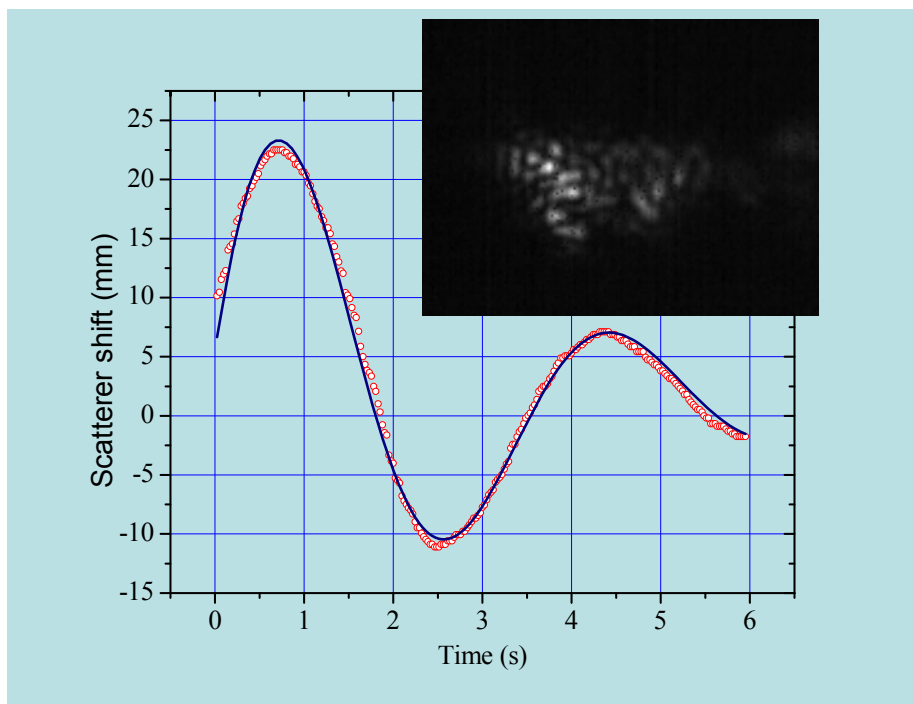
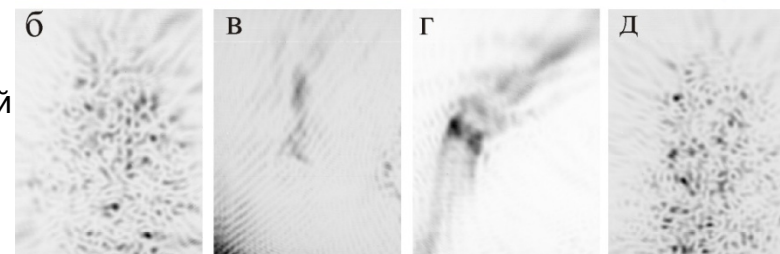
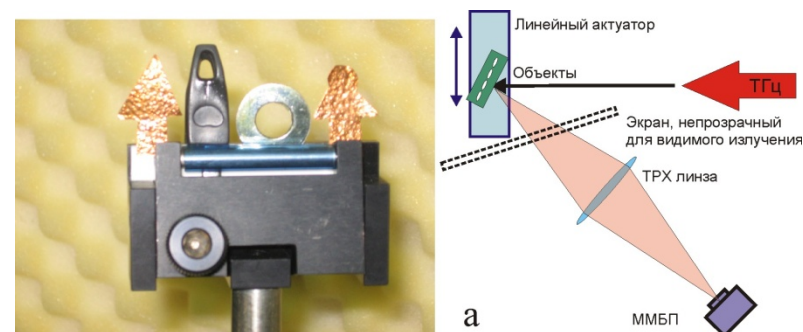
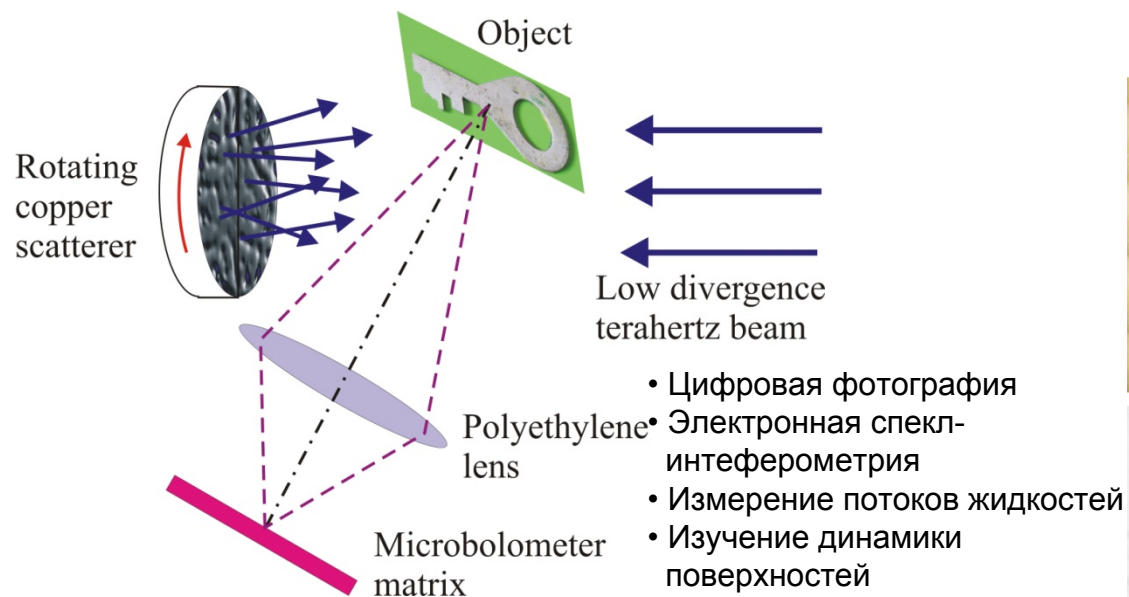


$D = 40$  мм

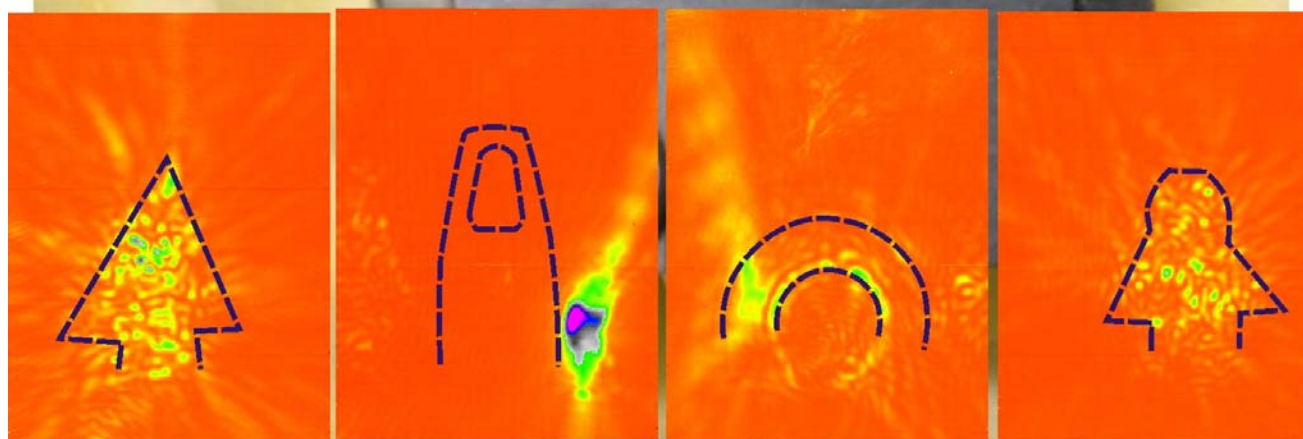
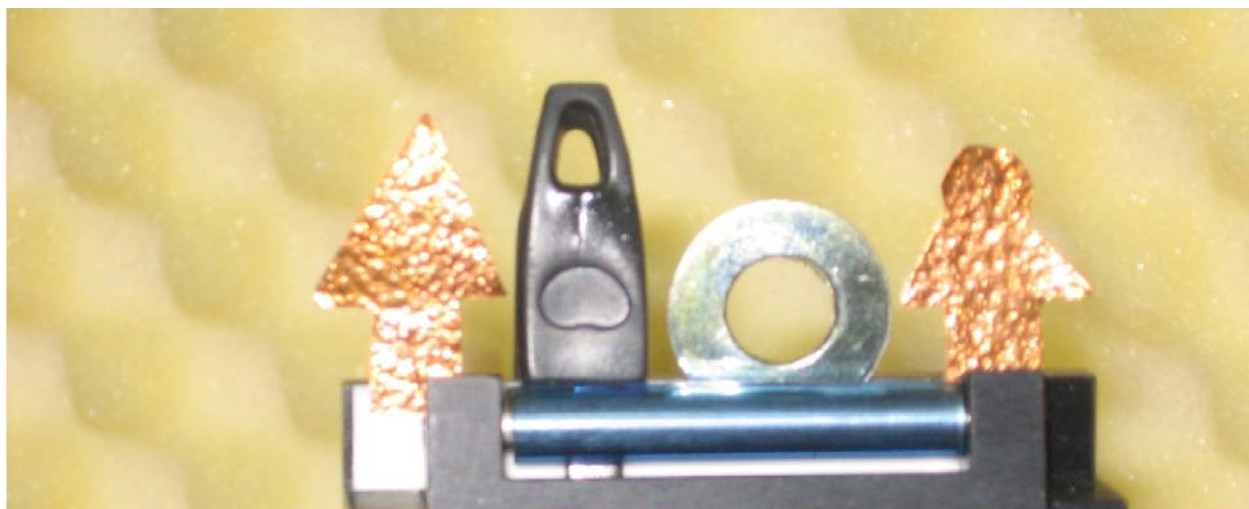


$D = 80$  мм

# Использование спектров для измерения перемещений

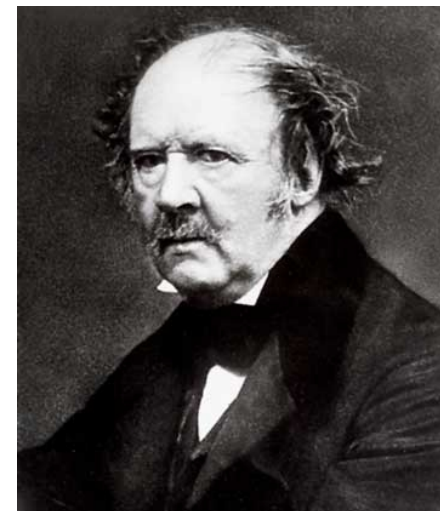
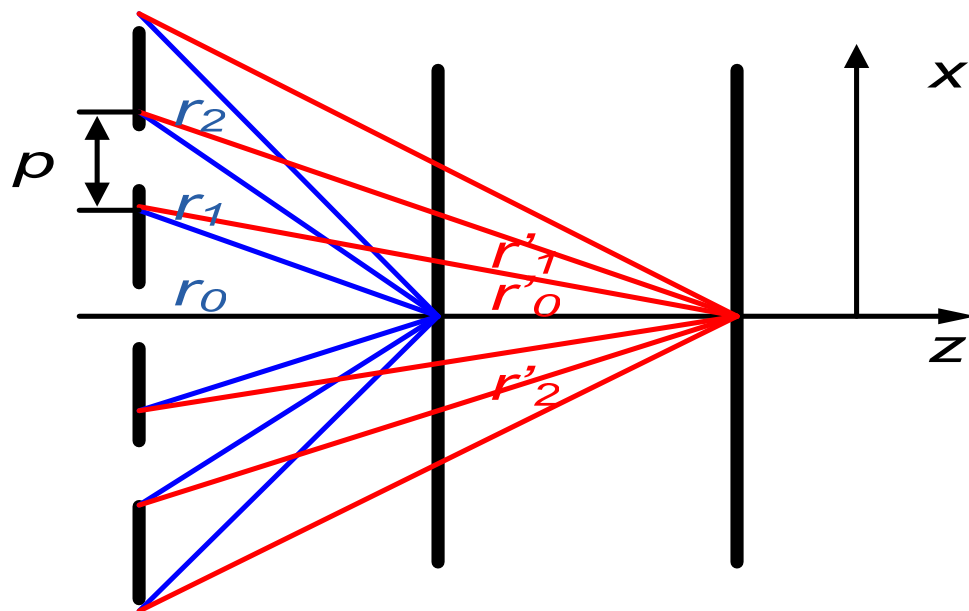


# Регистрация движущихся скрытых за непрозрачным экраном объектов (кадры из терагерцового видео)



# Тальбот-эффeкт

## Эффект Тальбота (Talbot effect)



William Henry Fox Talbot  
1800-1877

- Эффект регулярного самовоспроизведения периодической структуры, освещаемой монохроматическим излучением, открыт Тальботом в 1836
- Лорд Рэлей в 1881 объяснил его как естественное следствие френелевской дифракции и вычислил положения "плоскостей Тальбота"

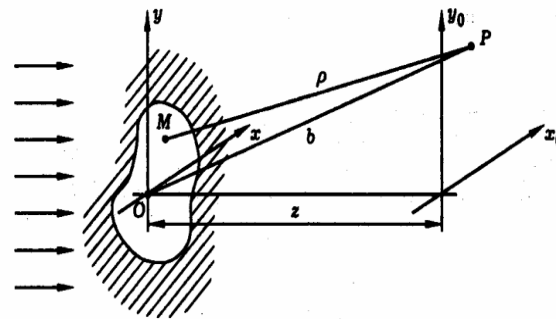
# Теория тальбот-эффекта (главные и вторичные плоскости Тальбота)

Положение главных  
тальботовских плоскостей:

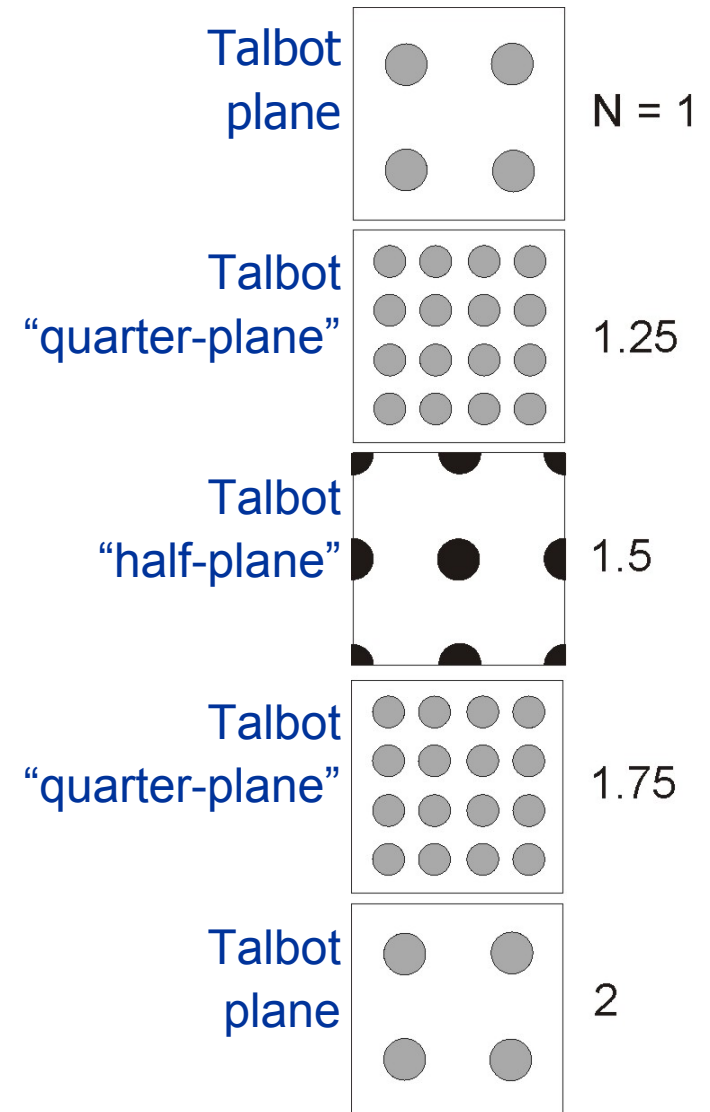
$$Z_N = 2 \frac{p^2}{\lambda} N$$

1. Интеграл Френеля-Кирхгофа для отверстия

$$E(r_0, z) = \frac{\pi i E_0}{\lambda z} \exp \left[ -ik \left( z + \frac{r_0^2}{2z} \right) \right] \int_0^{R^2} J_0 \left( \frac{kr_0 \sqrt{x}}{z} \right) \exp \left( -\frac{ikx}{2z} \right) dx,$$



2. Суммирование по всем отверстиям  
(принцип суперпозиции)





# Применение тальбот-эффекта

- Освещающие системы
- Тальбот-интерферометрия (муаровые картины)
- Исследование искажения волнового фронта\*
- Измерение расстояний\*
- Измерение длины волны\*,\*\*

---

\* Продемонстрировано на НЛСЭ

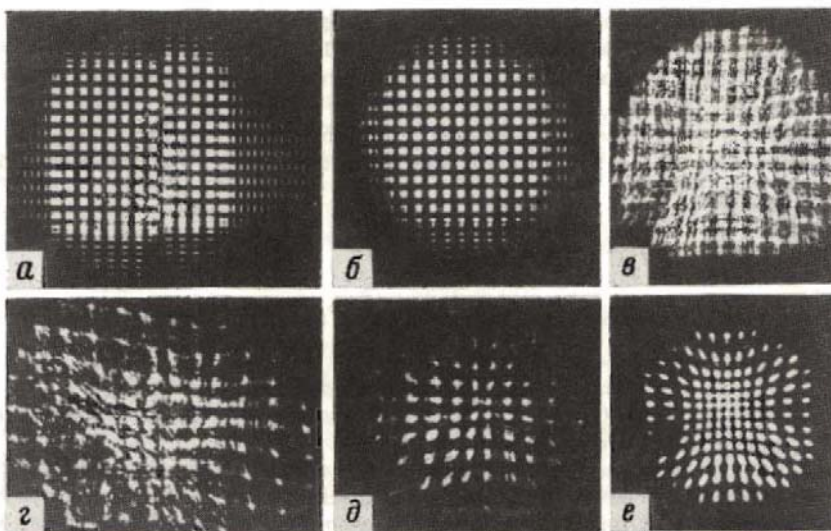
\*\* Первое применение

# Эффект Тальбота в разных спектральных диапазонах

Тальбот-эффект наблюдался и использовался:

- в видимой и ИК областях
- в рентгеновском диапазоне
- в микроволновой области
- для атомных пучков в кристаллах

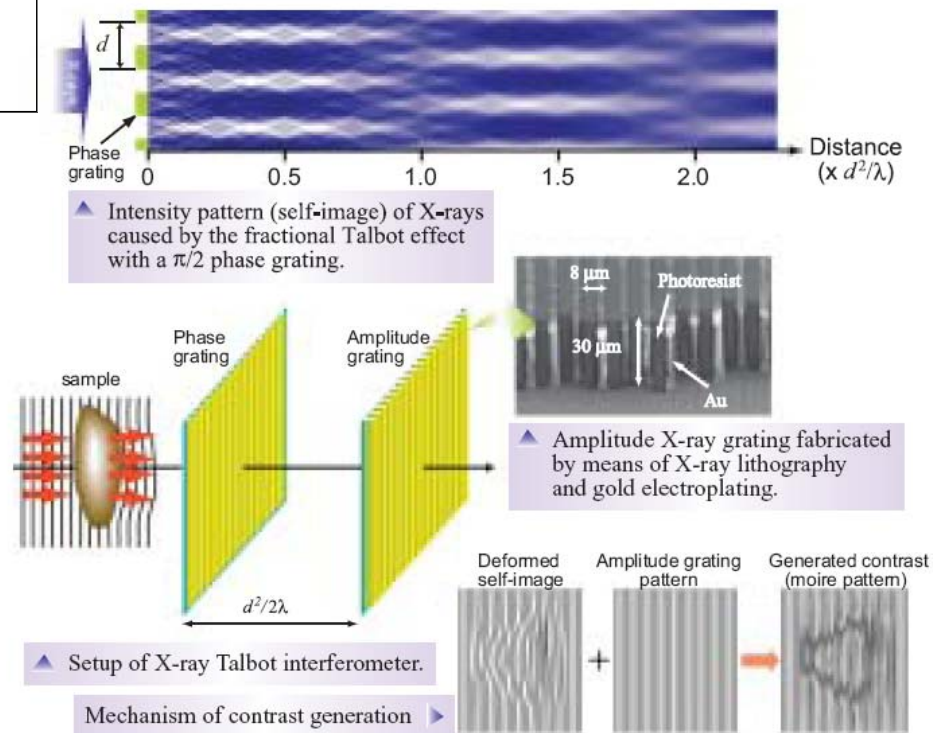
## Wavefront quality of IR laser beams



А.С. КОРЯКОВСКИЙ, В.М. МАРЧЕНКО, А.М. ПРОХОРОВ

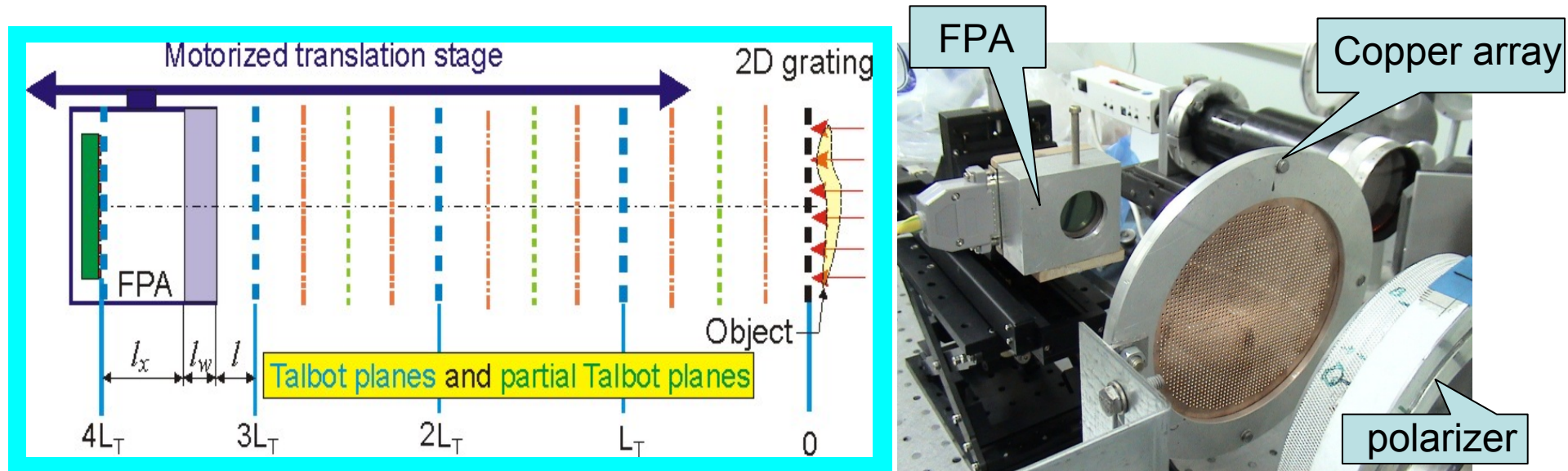
A.S. Koryachkovsky et al. Proceedings of the A.M. Prokhorov General Physics Institute, V.7, P. 33, 1987

## Фазовая томография с помощью рентгеновской тальбот-интерферометрии



SPring 8, A Momose, W. Yashiro, T Hattori (2006)

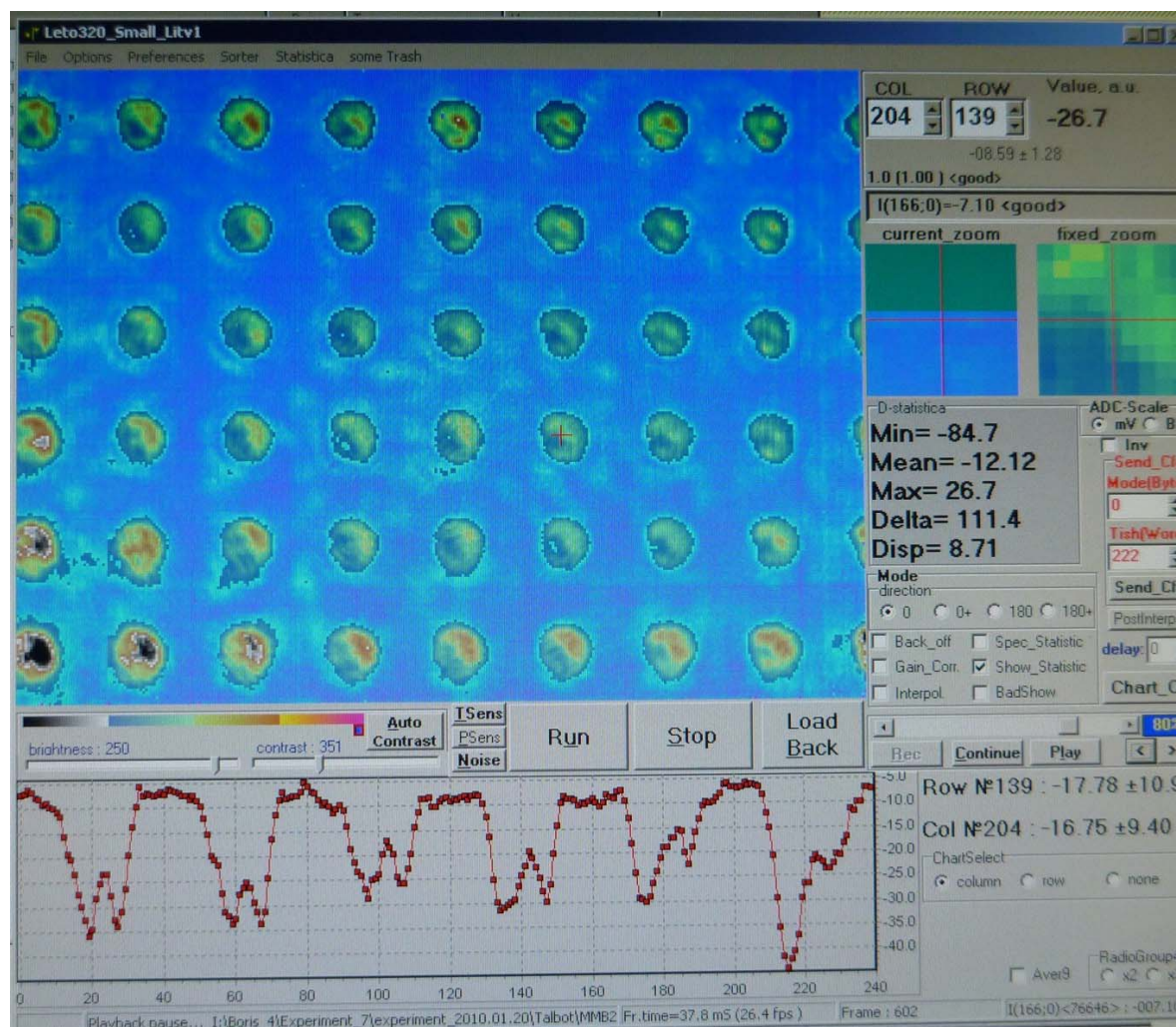
# Первая демонстрация тальбот-эффекта в ТГц диапазоне (Новосибирский ЛСЭ)



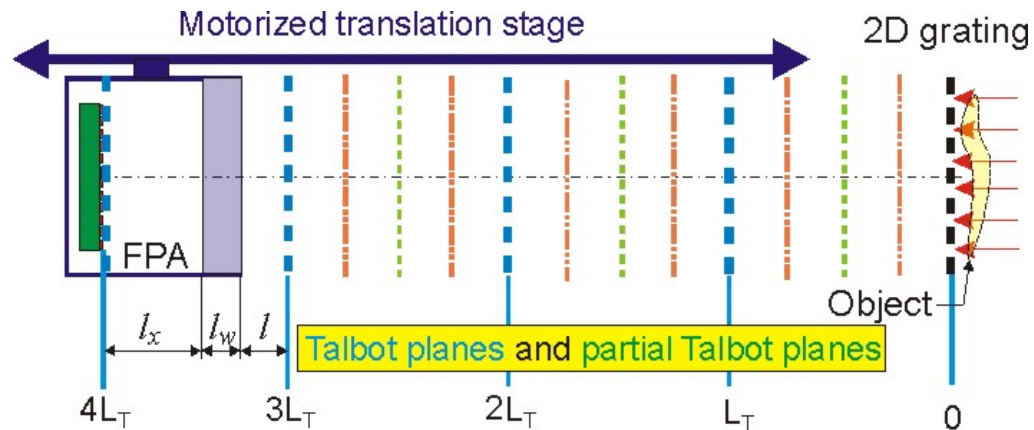
## Экспериментальная установка:

- **Решетка:** Медная фольга с круглыми отверстиями  $d = 1.00$  мм,  $p = 2.07$  мм
- **Terahertz source:** НЛСЭ (генерирует монохроматическое излучение в диапазонах  $\lambda = 110 - 240$  мкм and  $\lambda = 40 - 80$  мкм)
- **Регистратор:** неохлаждаемый  $320 \times 240$  VOx матричный микроболометрический приемник (FPA)
- **Моторизованная подвижка:** Ход - 200-мм, управляется компьютером

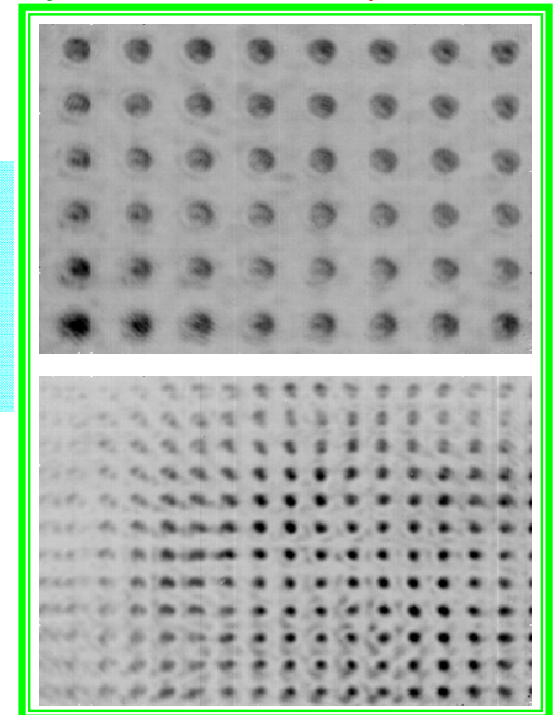
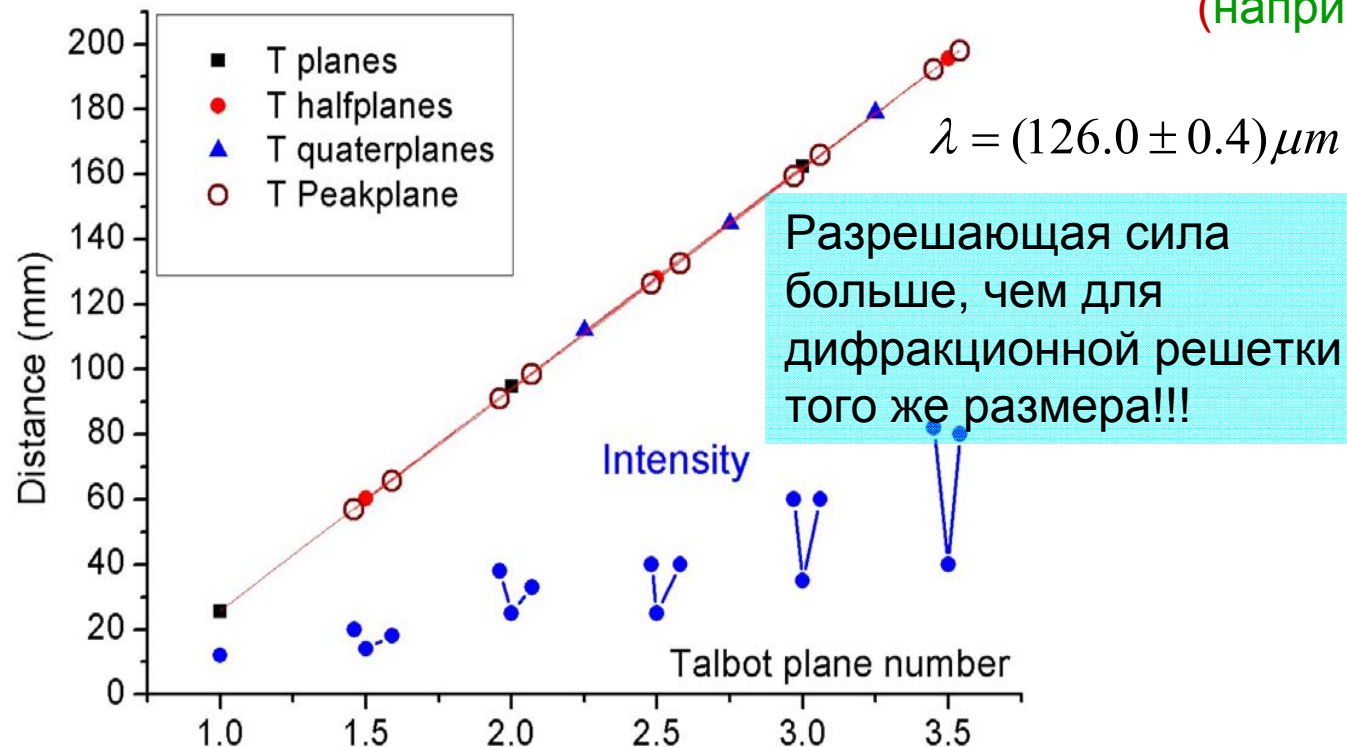
# Изображение плоскости Тальбота, снятое матричным микроболометрическим приемником (длина волны 130 мкм)



# Применение эффекта Тальбота в ТГц диапазоне

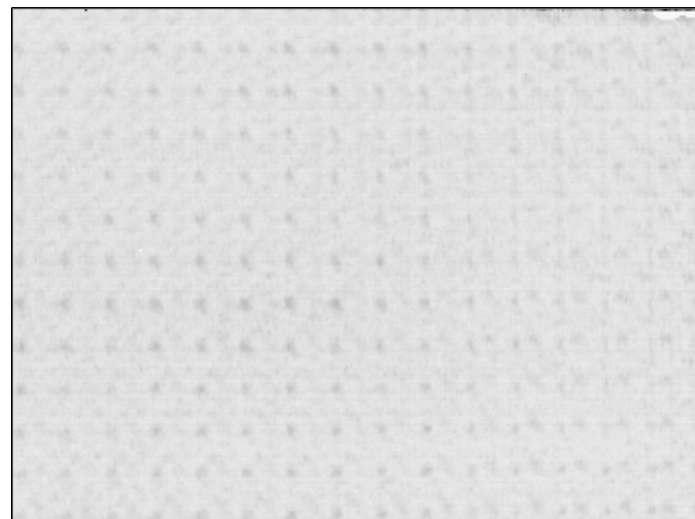
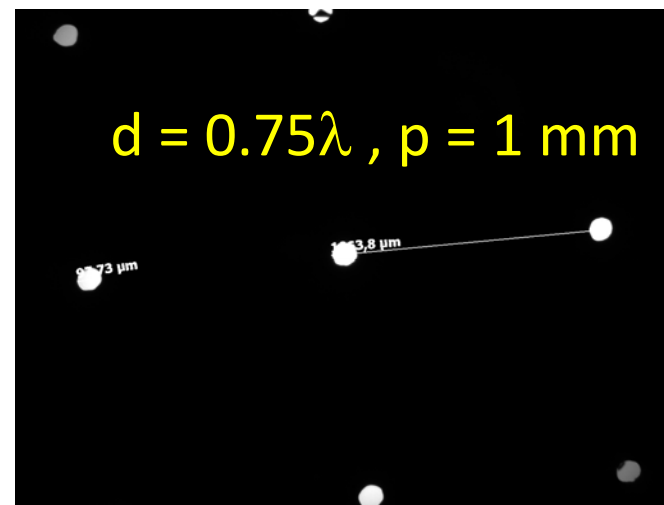
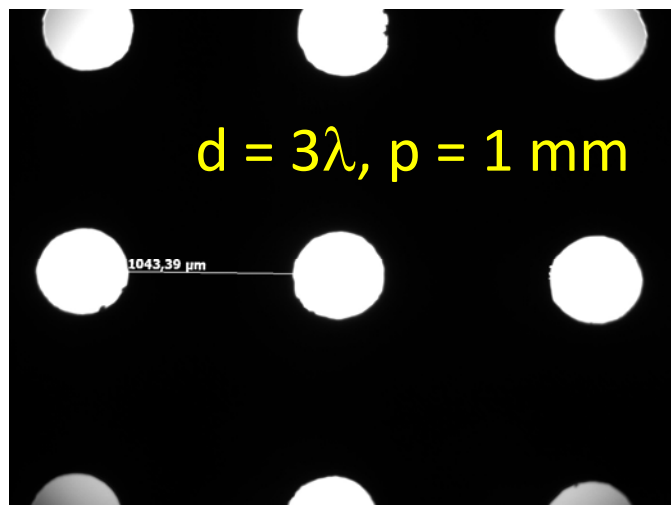


- Измерение длины волны ЛСЭ
- Измерение неизвестного расстояния  $l_x$  между Si окном и матрицей в ММБП
- Изучение турбулентности
- Исследование фазовых объектов  
(например, ТРХ линзы)

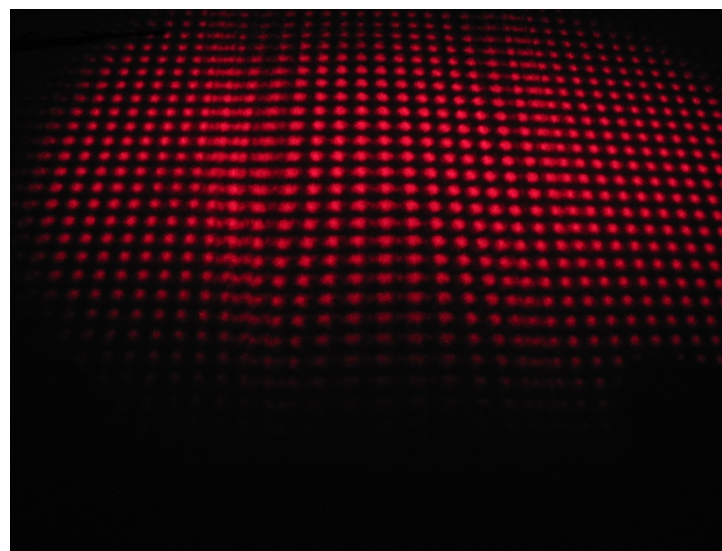
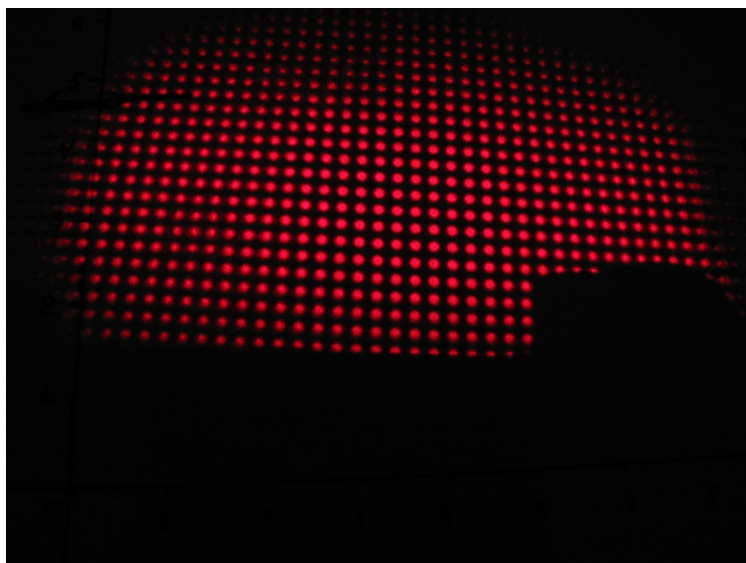
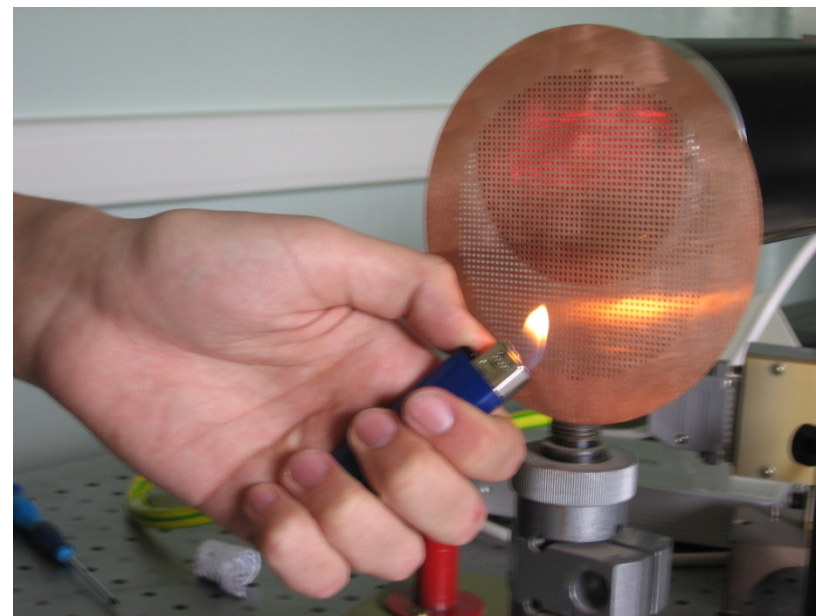
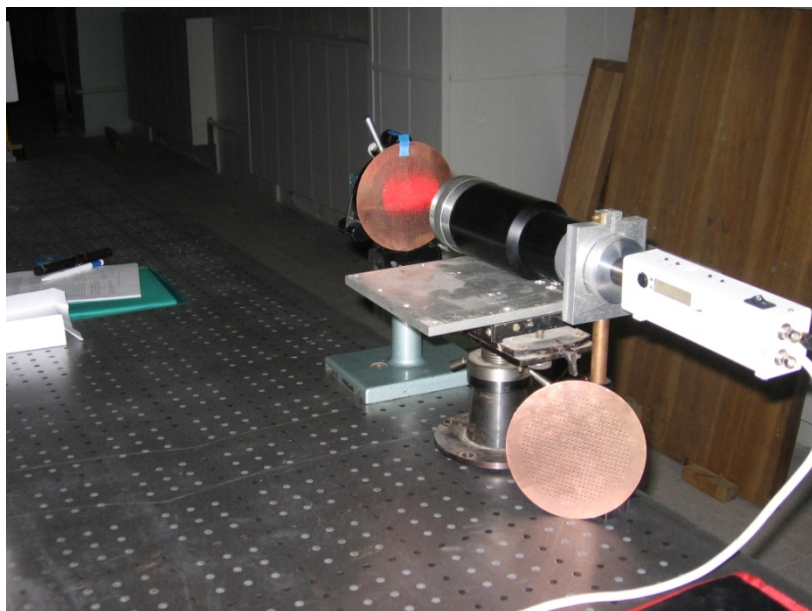


# Эффект Тальбота наблюдается даже для решетки с субволновыми отверстиями!!!

ТГц видео (ММБП), Длина сканирования вдоль оси - 90 мм.  
Толщина фольги - 90 мкм. Длина волны ЛСЭ - 140 мкм



# Эффект Тальбота на той же решетке в видимом диапазоне: регистрация дисторсии волнового фронта

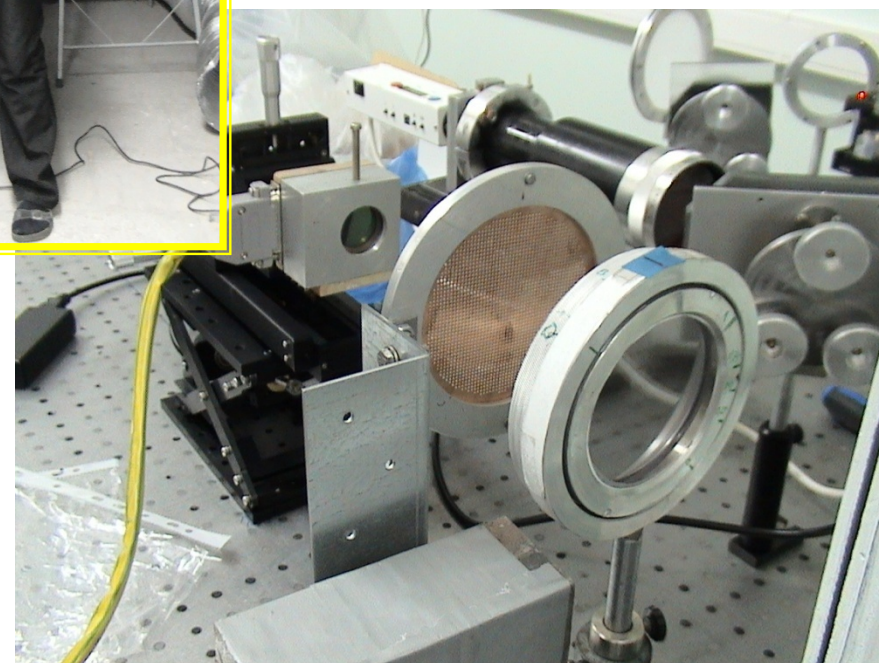


# Эффект Тальбота: Эксперименты в терагерцовом и видимом диапазонах

Visible

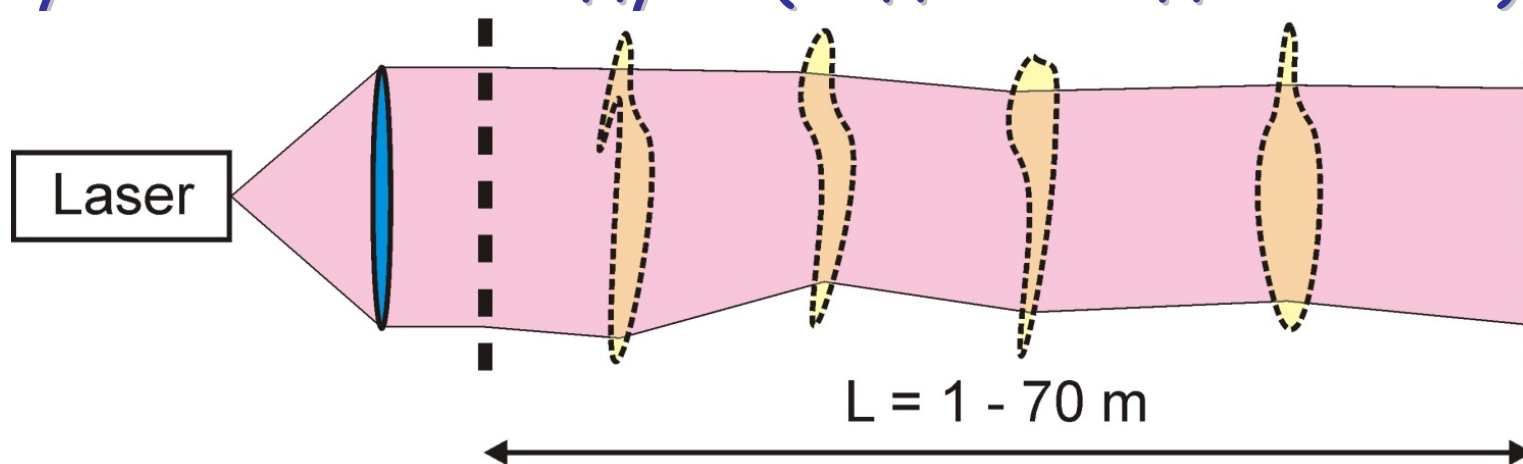


Terahertz





# Применение эффекта Тальбота для исследования турбулентности воздуха (видимый диапазон)



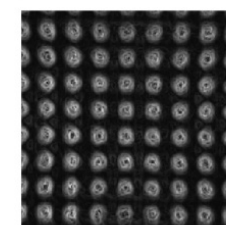
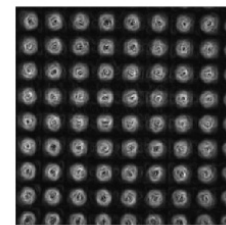
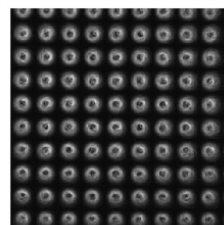
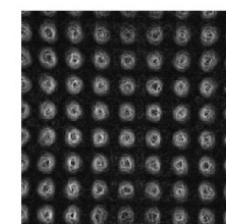
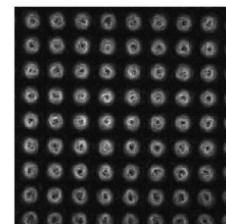
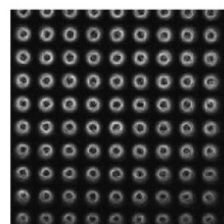
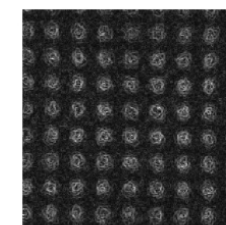
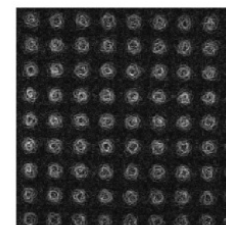
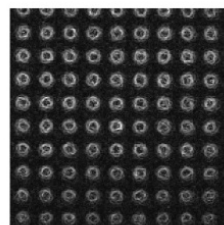
Кадры из видеофильма, снятого с помощью камеры PI Max2 с разными временами экспонирования (ПЗС камера с микроканальным усилителем)

Расстояние от решетки ( $d = 1 \text{ мм}$ ,  $p = 2.07 \text{ мм}$ )

1  $\mu\text{s}$

10  $\mu\text{s}$

100  $\mu\text{s}$



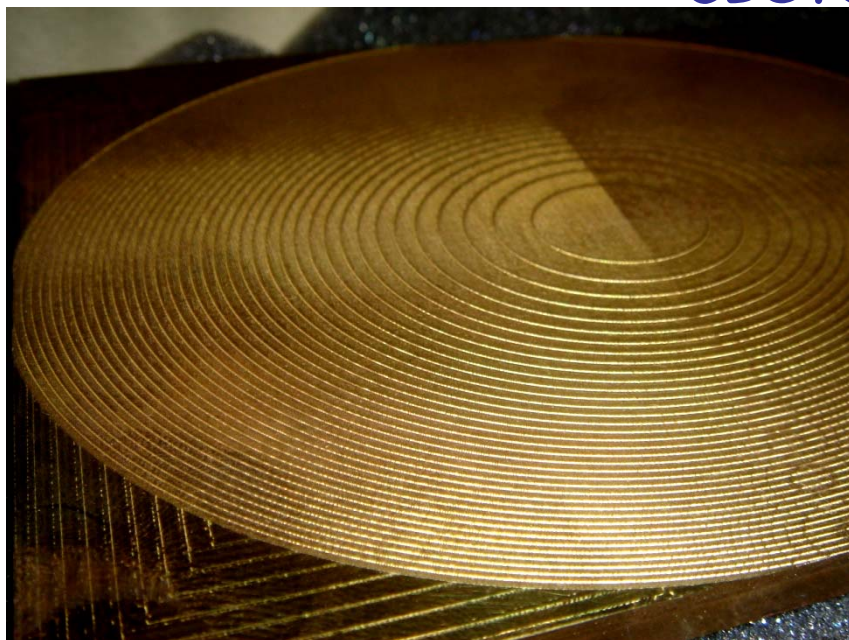
675 cm

2700 cm

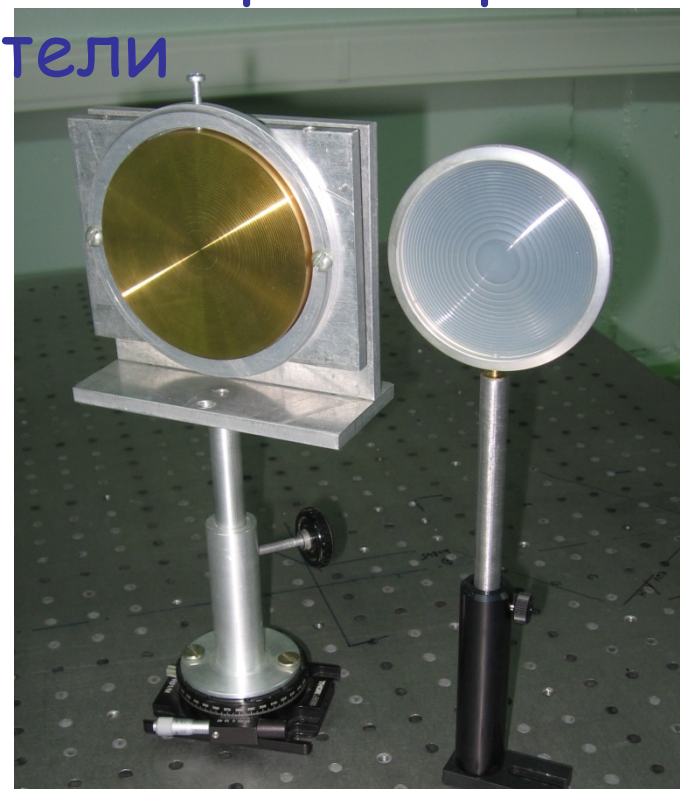
4300 cm

# Оптические элементы для ТГц

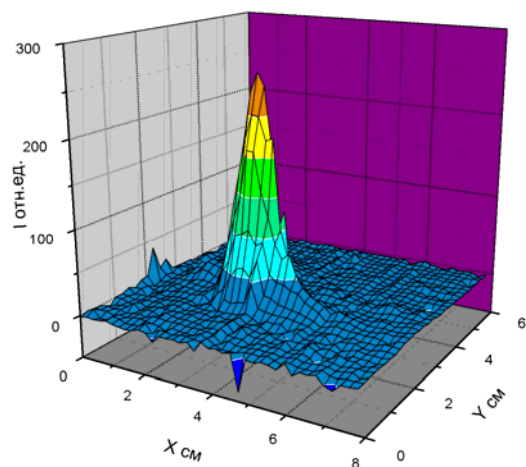
# Оптические элементы, поляризаторы, светоделители



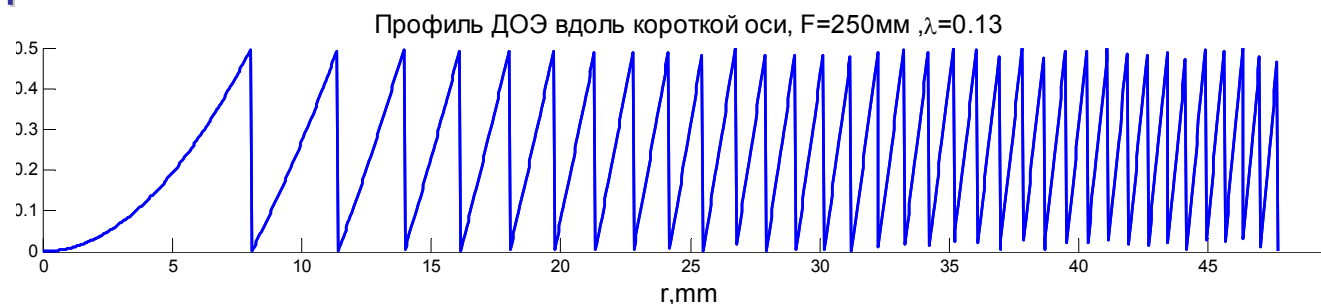
Френелевское зеркало (ИЯФ)



Полипропиленовая френелевская линза (КТИНП) с дифракционной эффективностью порядка 100%

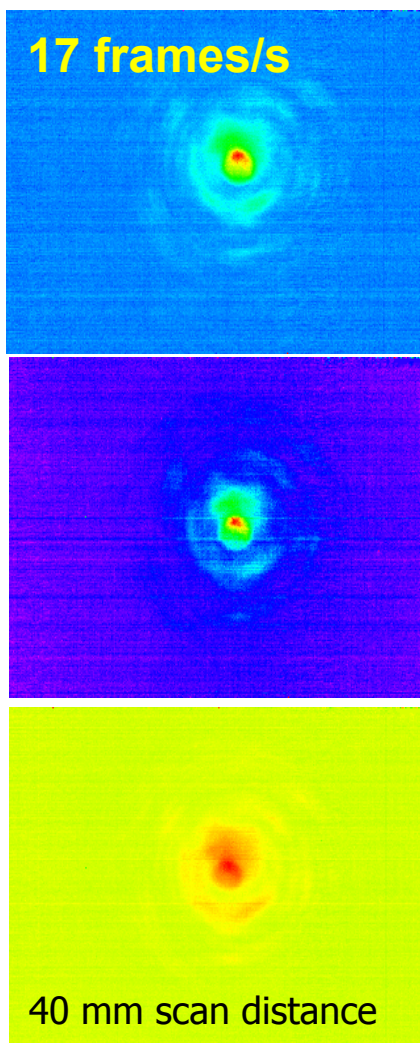


Фокус френелевского зеркала

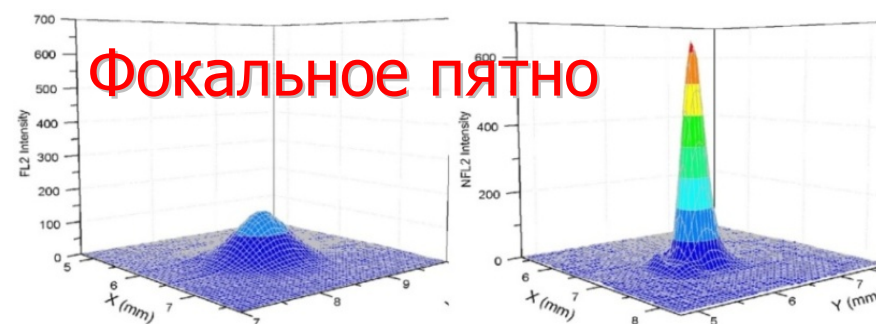
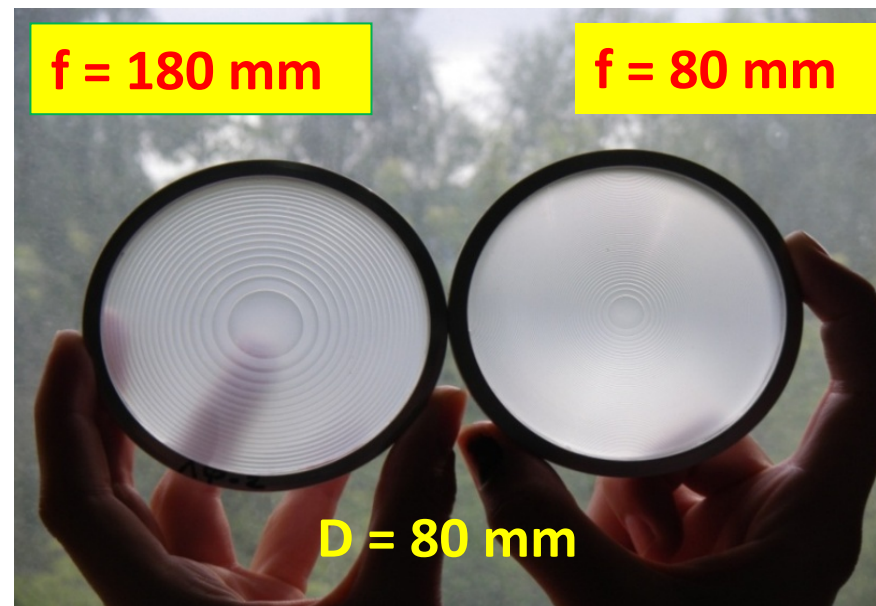


# Оптические элементы - 1

0.8-мм полипропиленовая киноформная линза (КЛ) изготовлена методом горячего прессования



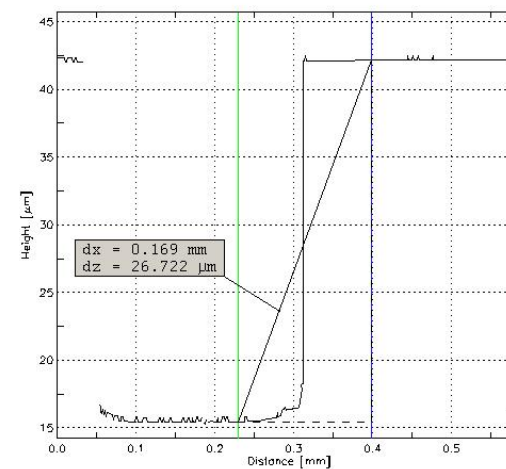
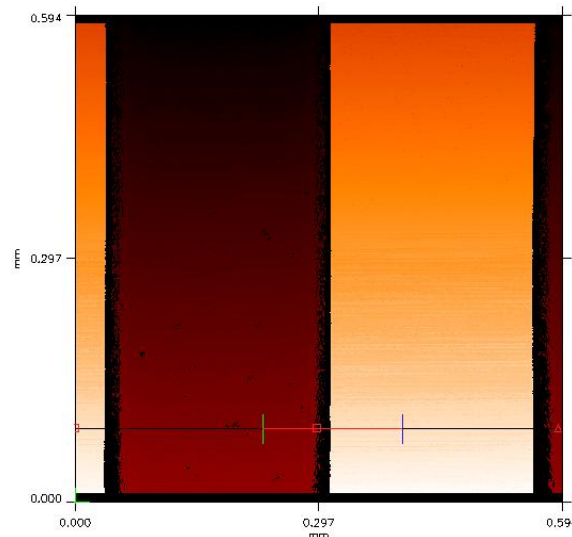
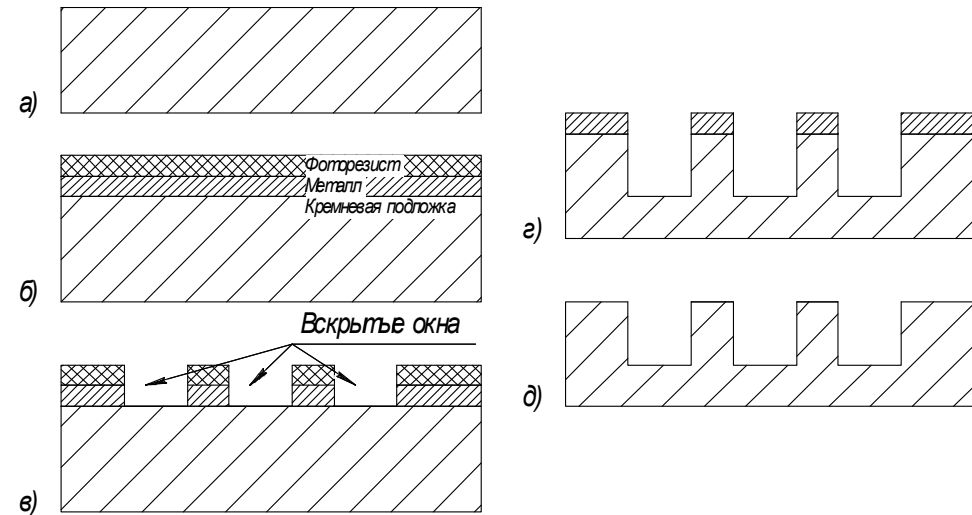
ТГЦ видео в реальном времени:  
Сечение пучка ЛСЭ, снятое с помощью трех образцов КЛ ( $f=80$  мм) матричным микроболометрическим приемником, перемещаемым моторизованной подвижкой



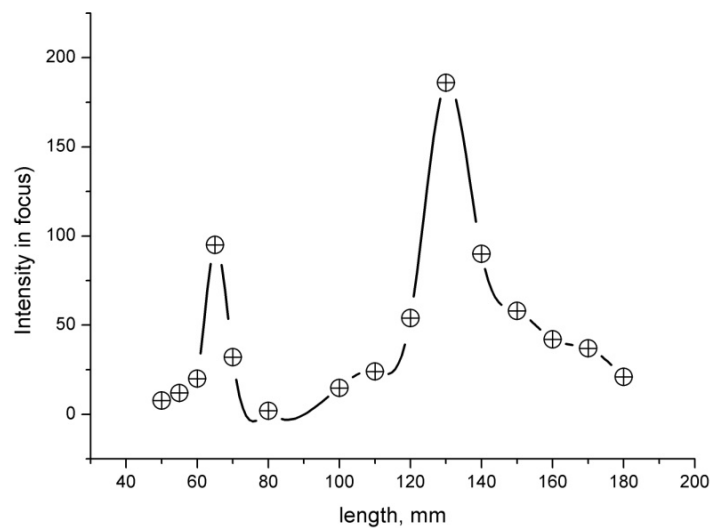
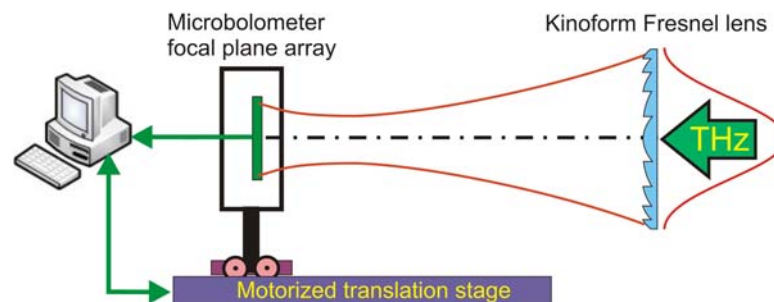
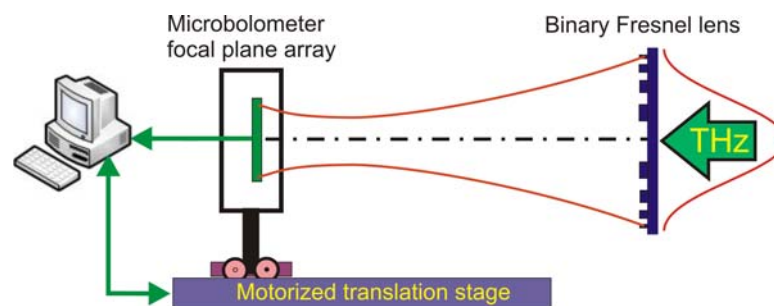
$$d_{1/2} = 0.8 \text{ mm}$$

$$d_{1/2} = 0.3 \text{ mm}$$

# Процедура изготовления бинарных ДОЭ



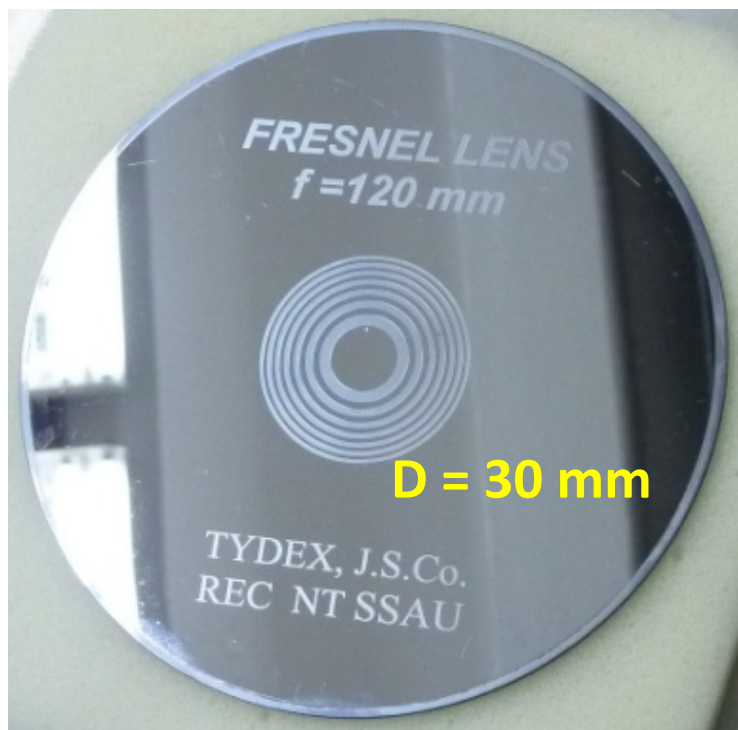
# Схема измерения характеристик кремниевых ДОЭ



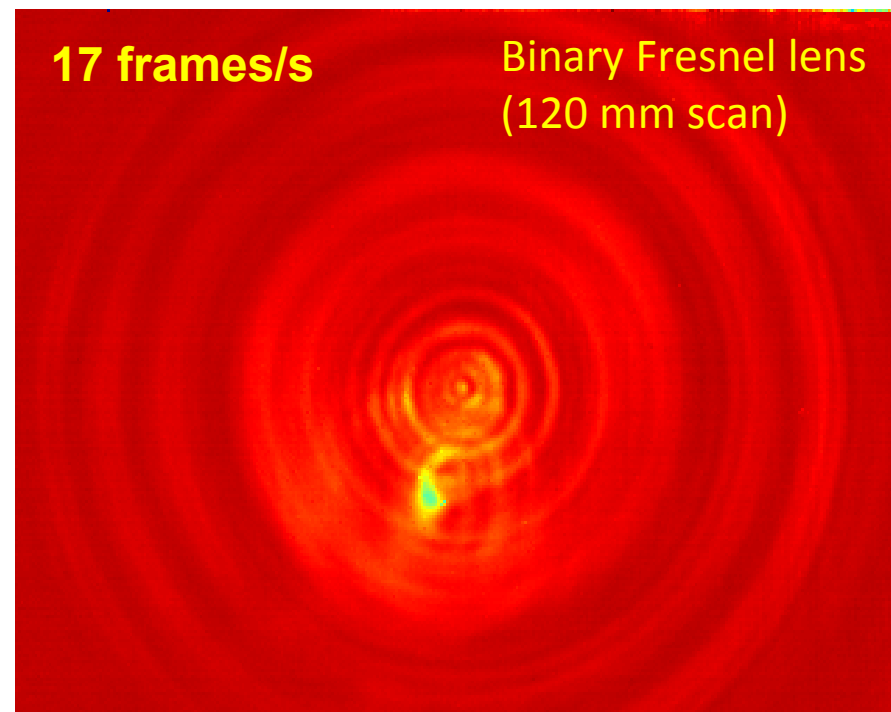
## Оптические элементы - 2

### Бинарная френелевская линза

Общий вид БФЛ с  
антиотражающим покрытием

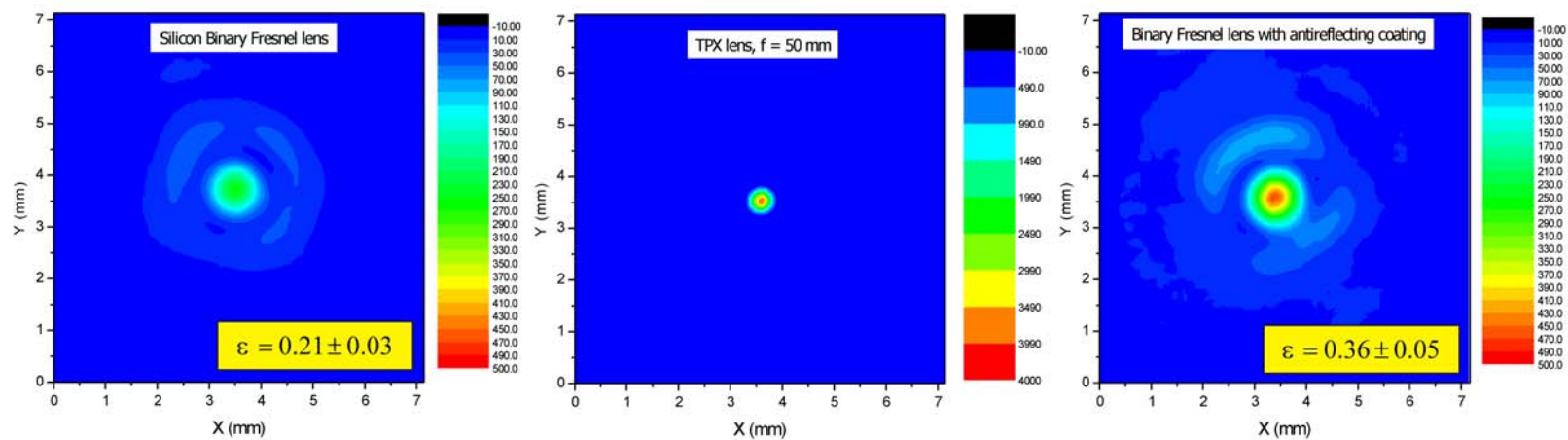


Терагерцовое видео с помощью ММБП:  
Пучок ЛСЭ фокусировался БФЛ (ММБП  
перемещался моторизованной подвижкой)



# Оптические элементы - 3

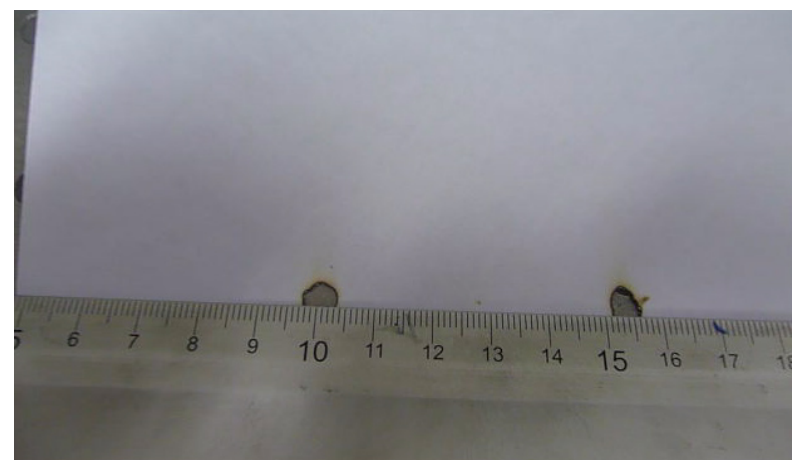
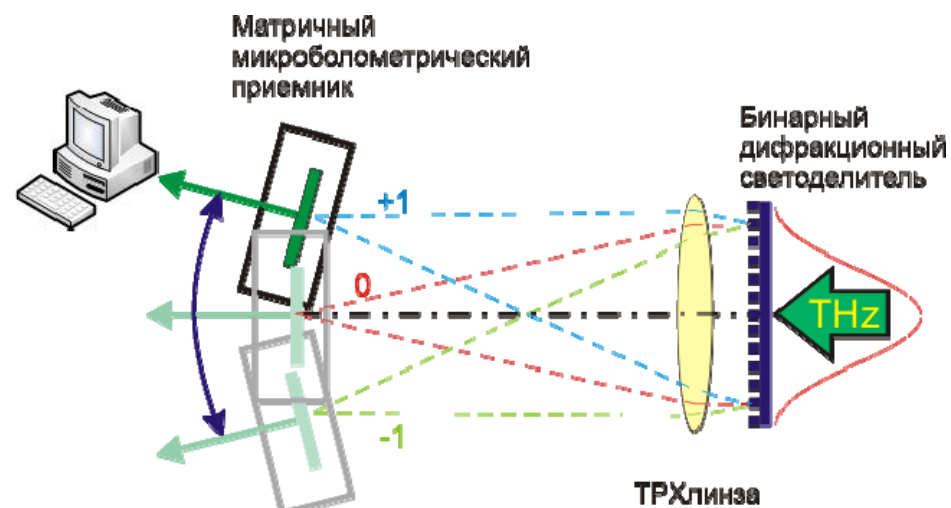
## Измерение дифракционной эффективности



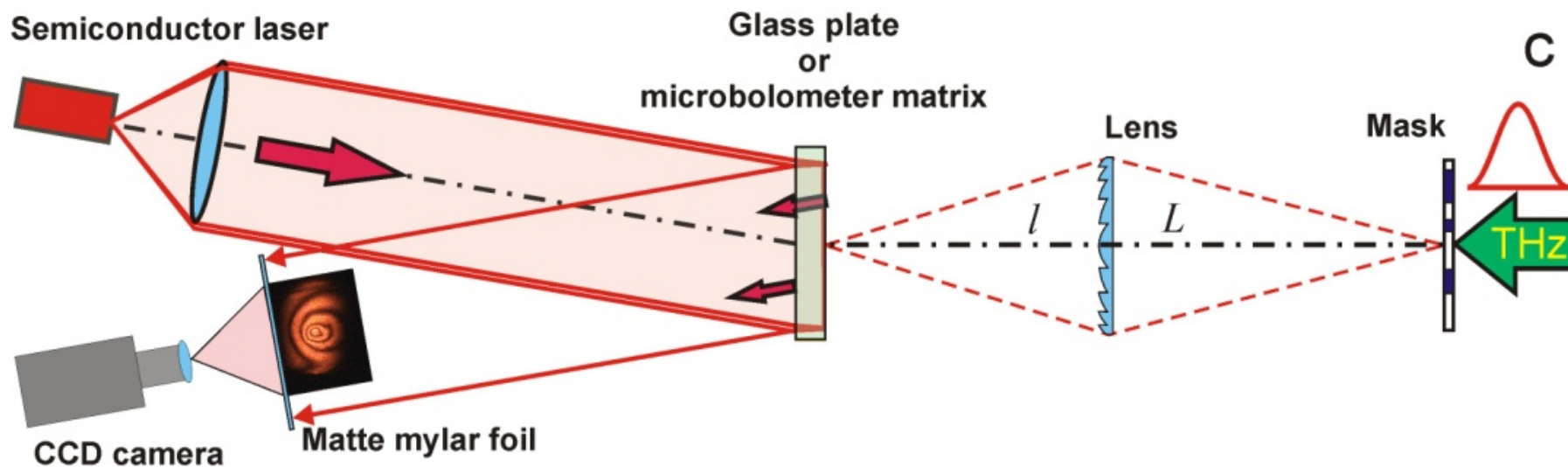
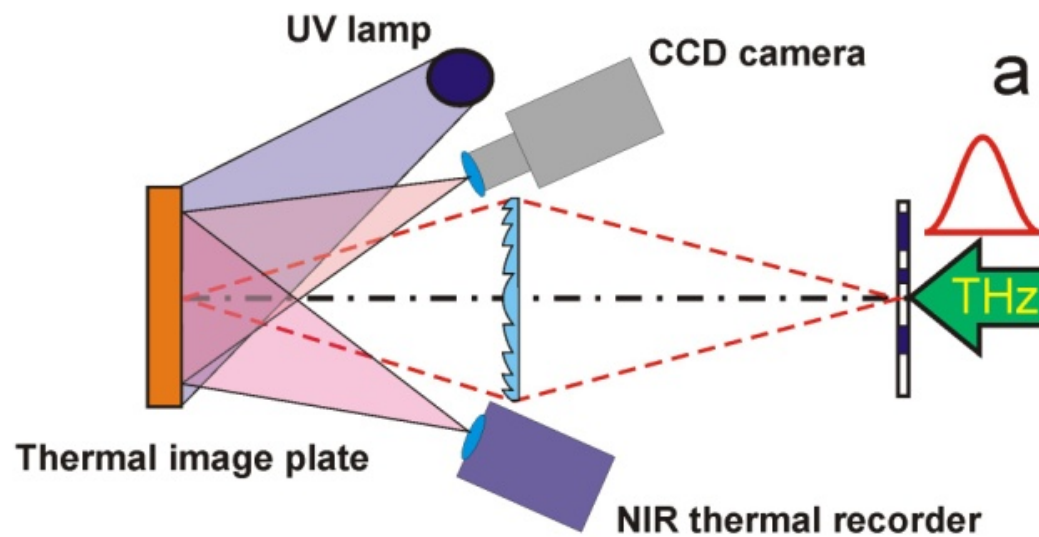
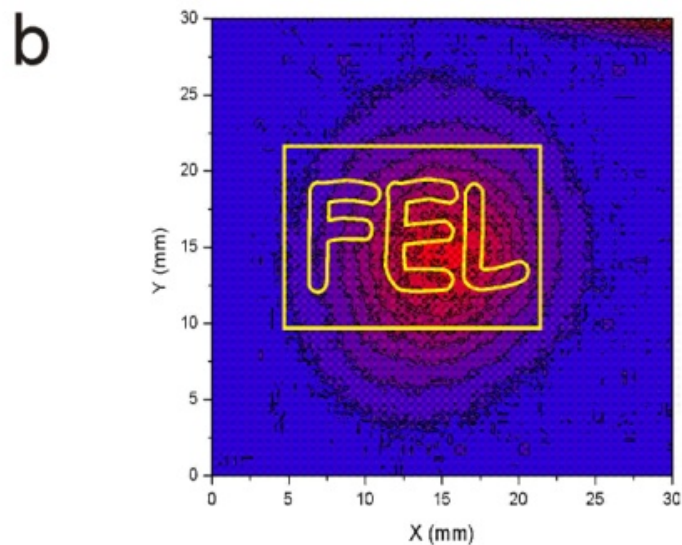


## Оптические элементы - 4

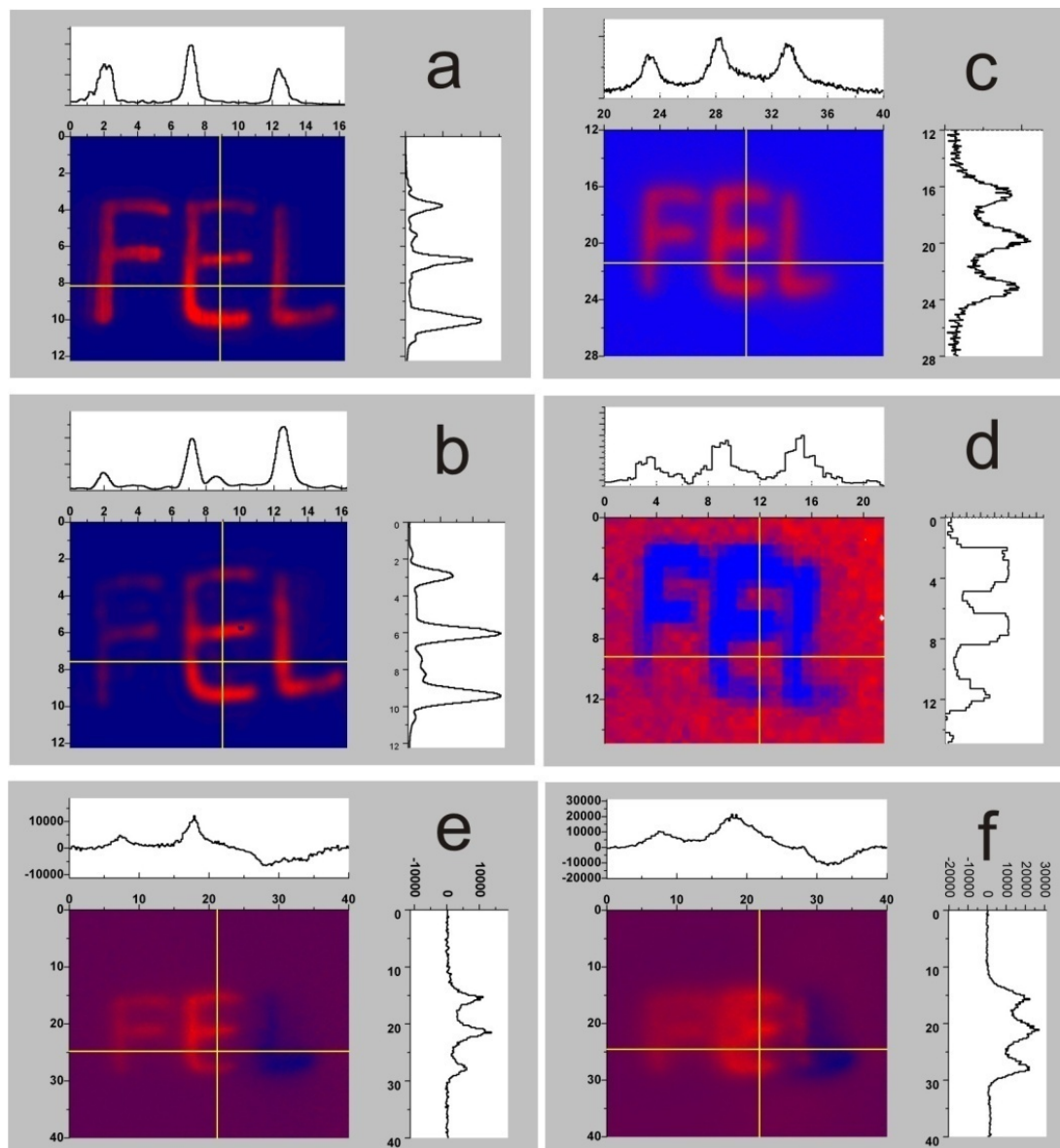
Измерение дифракционной эффективности бинарных  
кресниевых светоделителей



# Оптические системы - 1



# Оптические системы - 2



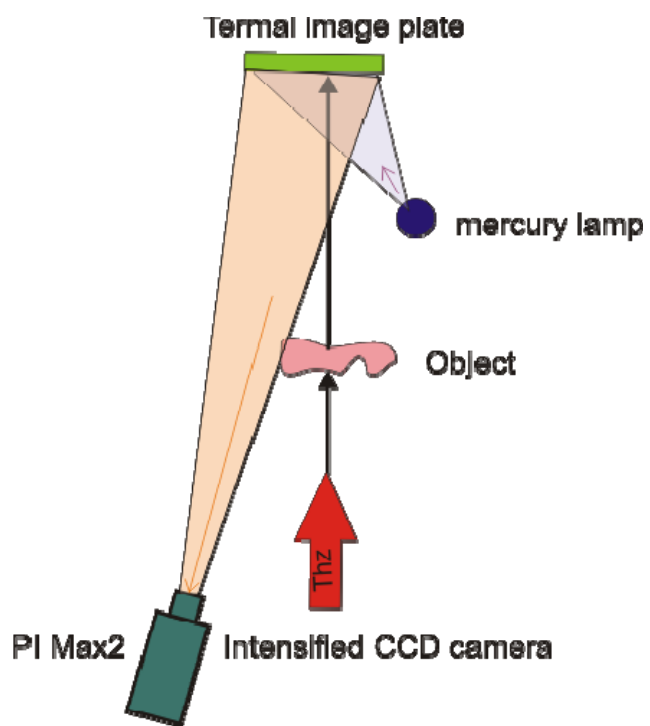
# Оптические системы - 3

## Характеристики изображающих систем

	Thermal recorder	Thermal sensitive interferometer	Microbolometer matrix	Thermal sensitive phosphor plate	
				Plate #7	Plate #8
$\Delta x$ (mm)	2	0.3	0.25	1	2
$\Delta t$ (s)	DS	0.02	0.02	0.2	1.3
Sensitivity	High	Medium	Very high	Very low	Low
f (fps)	25	10 - 50	10 - 50	4	1

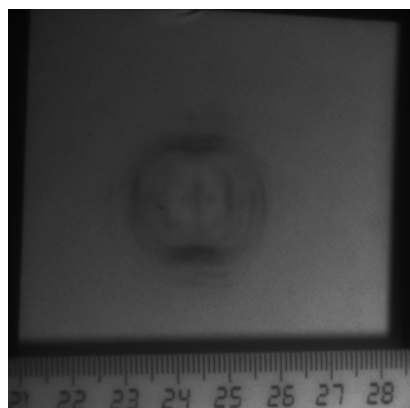
# Голография

# Осевая (габоровская) голография в ТГц диапазоне

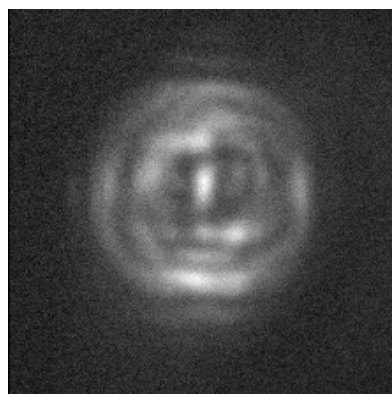


Голограммы записывались с помощью термочувствительного люминесцентного экрана, а затем изображение реконструировалось численно вычислением интеграла френеля-кирхгофа в области изображений

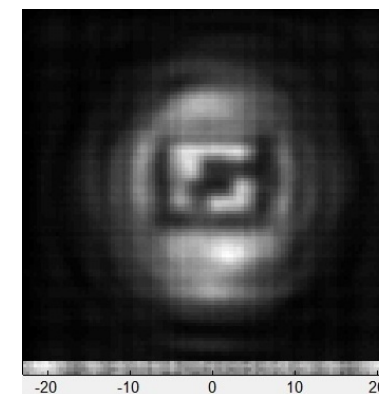
Записанное изображение



Цифровая голограмма



Реконструированное изображение

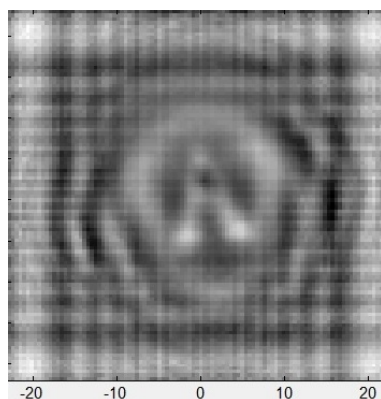


# Осевая (габоровская) голография в ТГц диапазоне

Как амплитудная, так и фазовая информация может быть реконструирована из голограммы

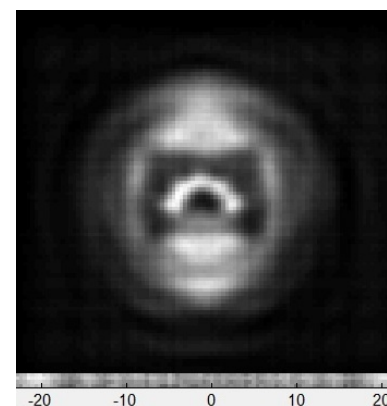
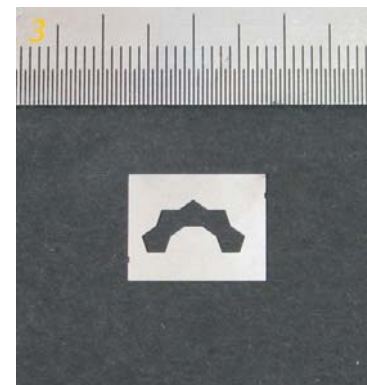
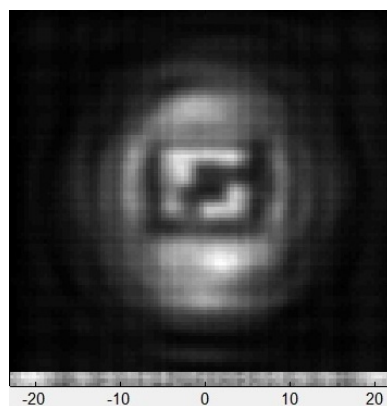
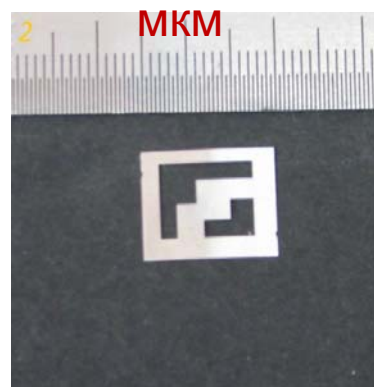
Достигнуто пространственное разрешение 0.4 мм при длине волны 0.13 мм

shaped foam  
polyethylene

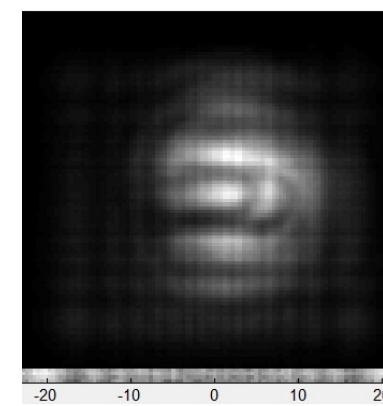


Phase distribution in  
the image plane

Metal masks, d=100

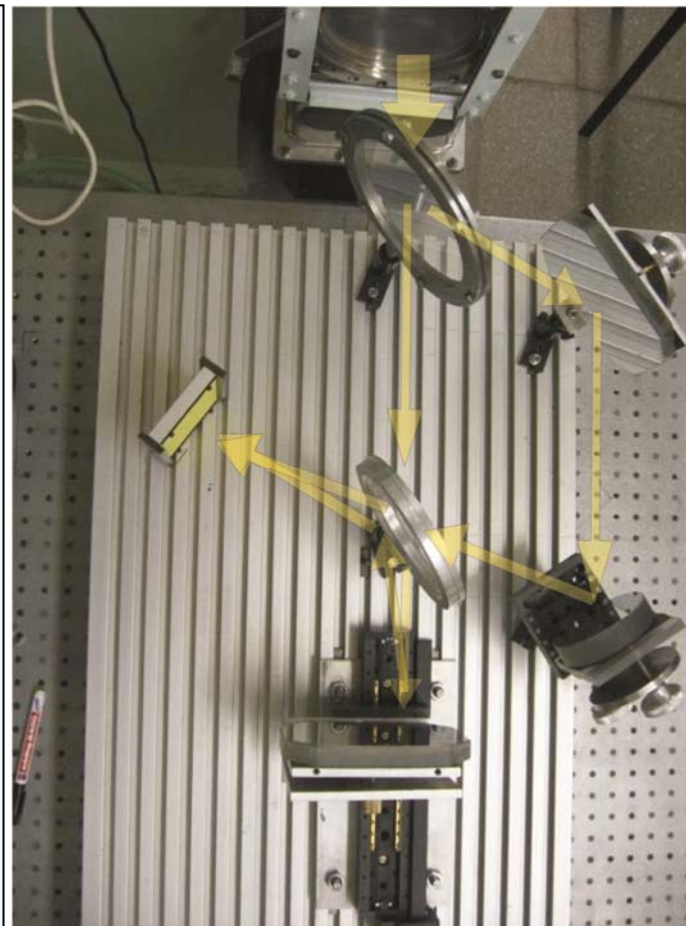
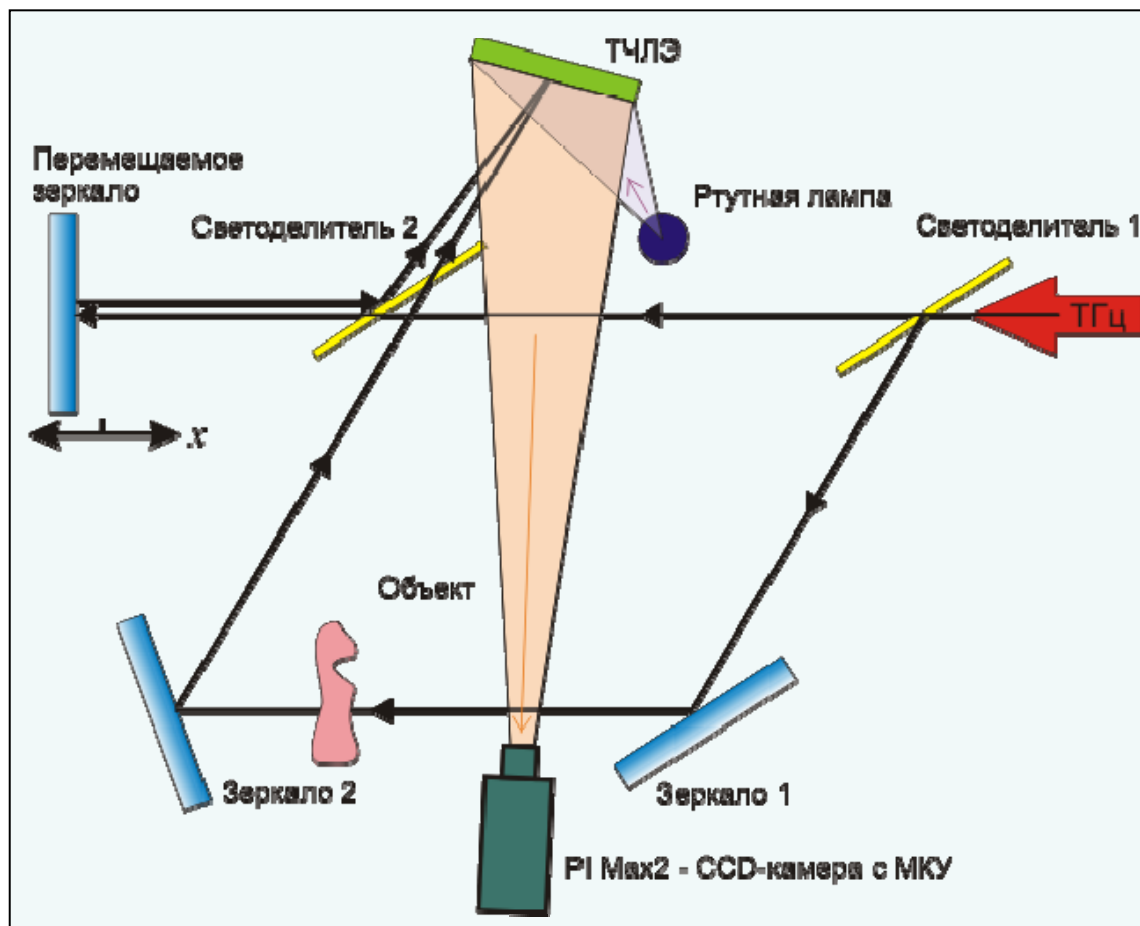


Metal clip



Amplitude distribution in the reconstructed real  
image plane

# Модифицированный интерферометр Маха-Цандера

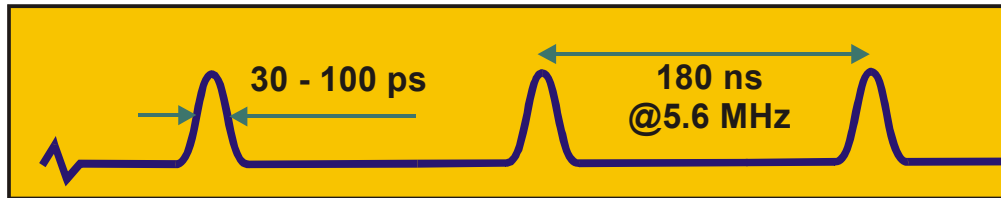


Голографическая система с опорным пучком основана на модифицированном интерферометре Маха-Цандера, в котором используется подвижное зеркало.

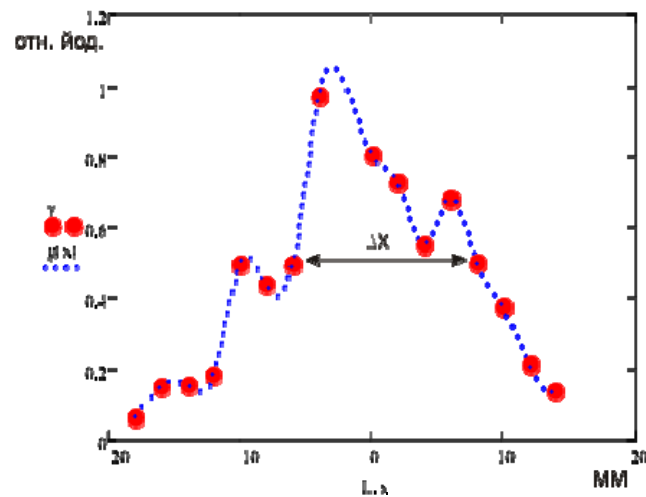


# Измерение длины когерентности

## Средняя длительность импульса ЛСЭ



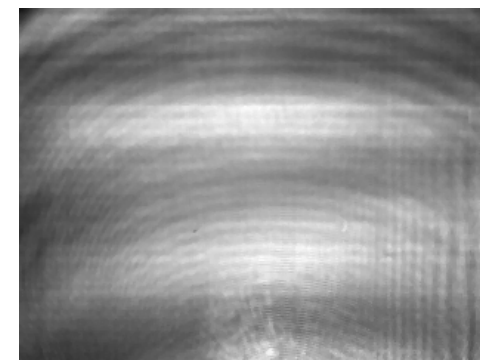
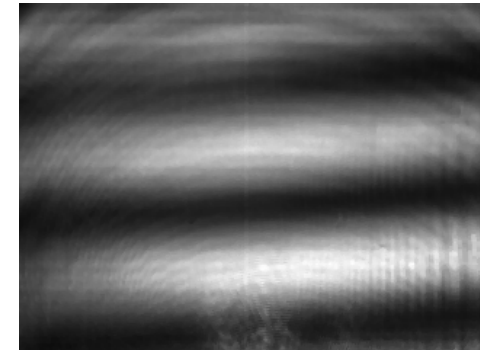
$$I = I_1 + I_2 + 2\gamma\sqrt{I_1 I_2} \cos(\varphi_1 - \varphi_2)$$



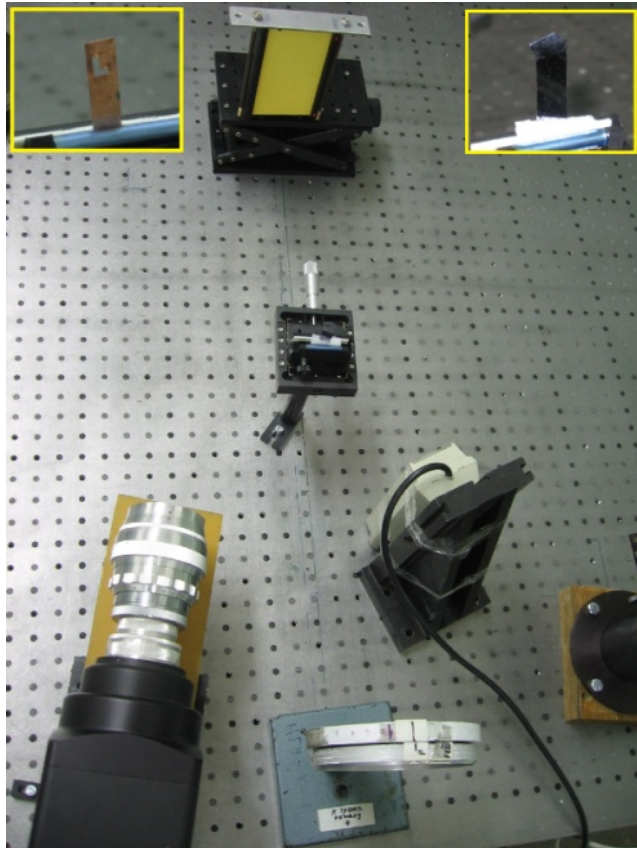
*Оптическая разность хода для наблюдения интерференционной картины не должна превышать длину когерентности.*

$$2\Delta x \approx 30 \text{ мм}$$

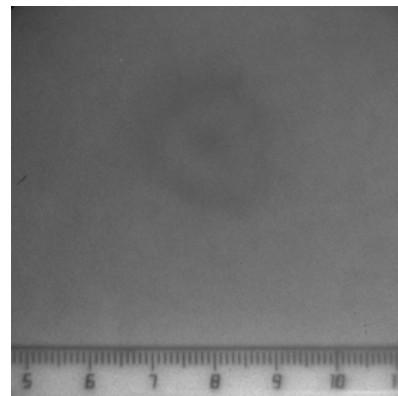
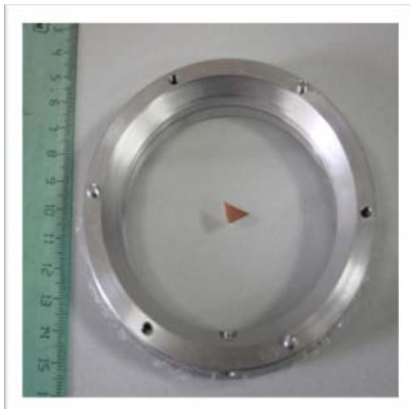
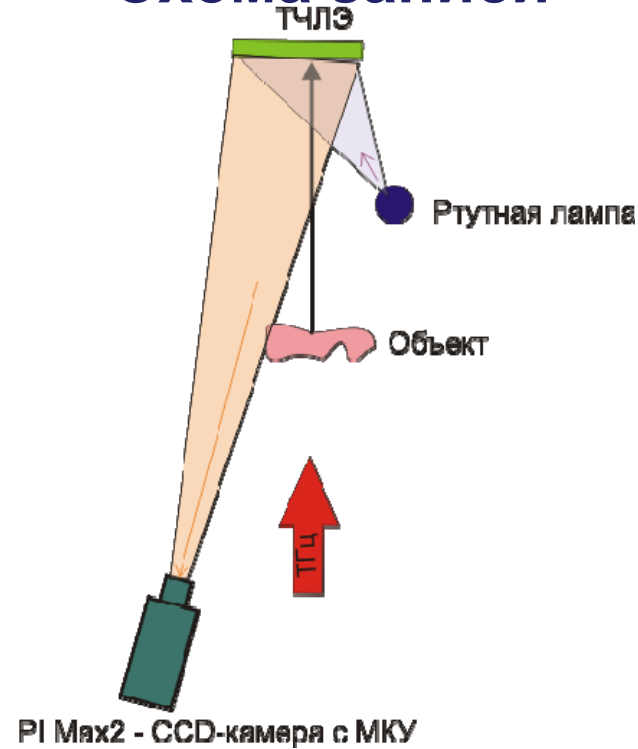
Длина когерентности ЛСЭ зависит от выбранного режима и отстройки резонаторов



# Схема установки для записи габоровских голограмм



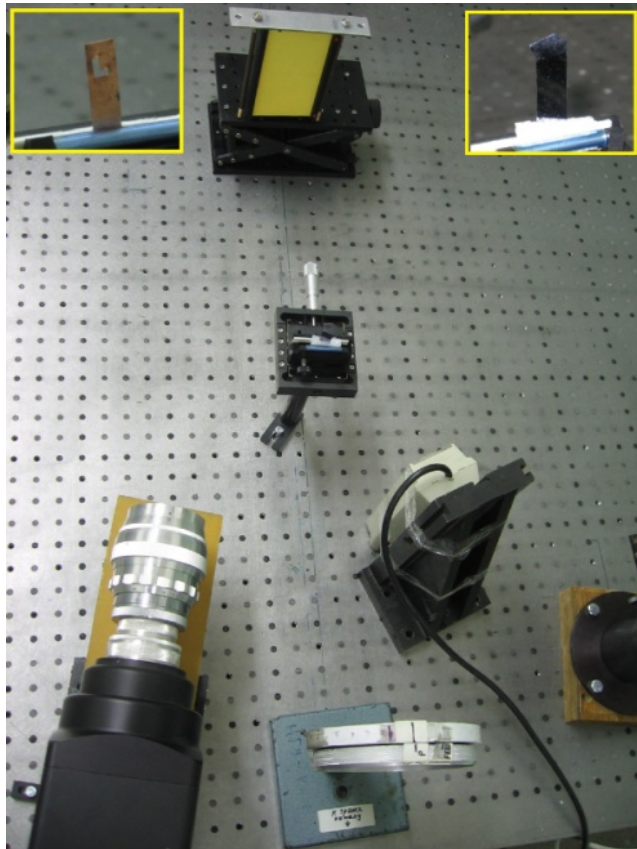
## Схема записи



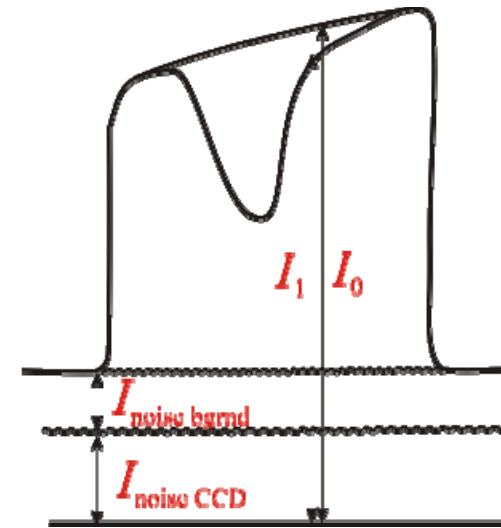
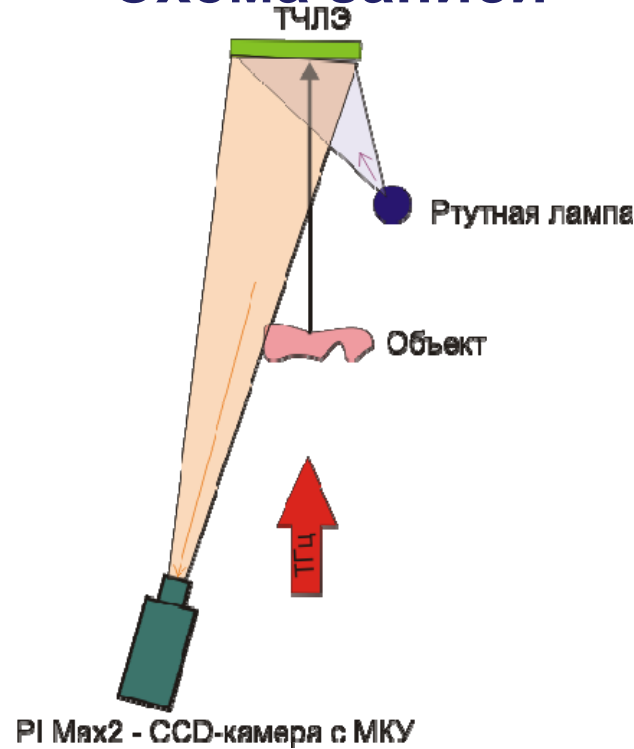
Температурная зависимость интенсивности люминесценции описывается законом Мотта

$$I = \frac{I_0}{1 + A \exp(-E/T)}$$

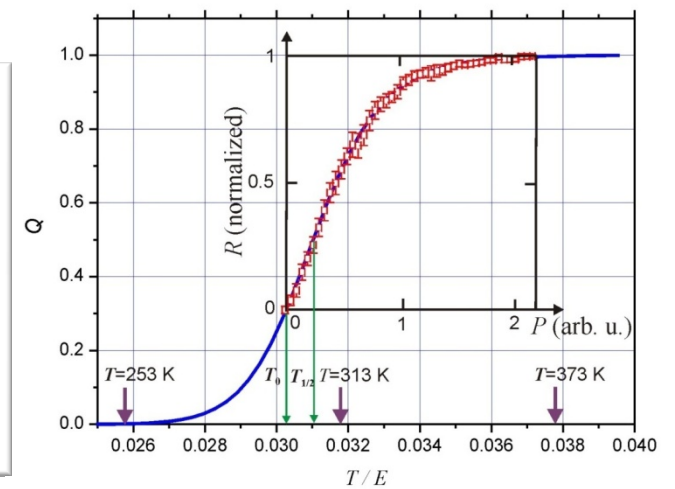
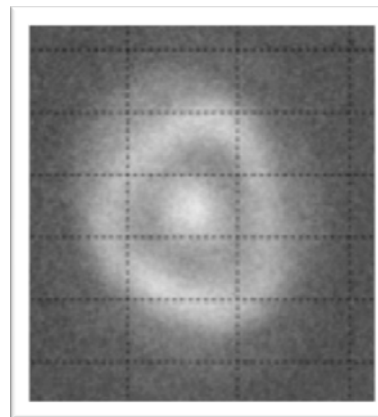
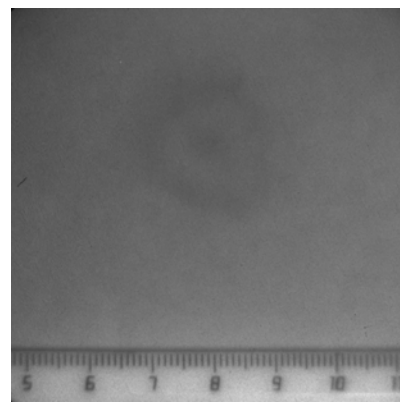
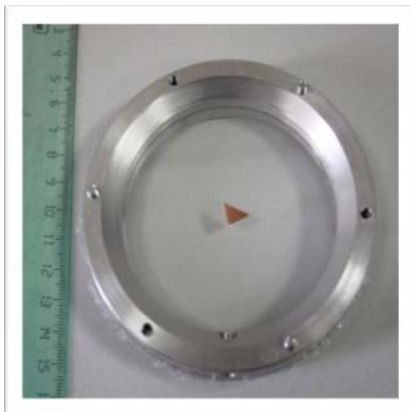
# Голография по схеме Габора - 2



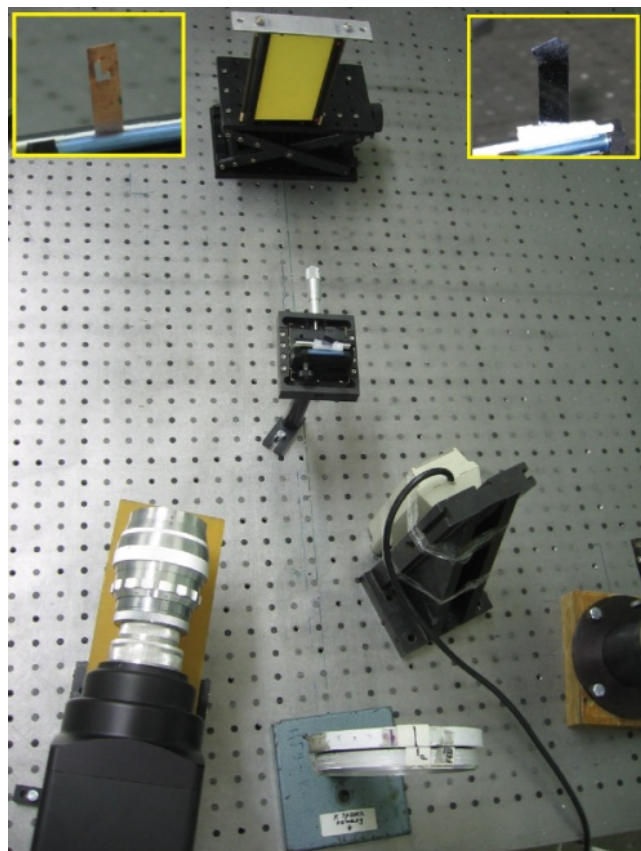
## Схема записи



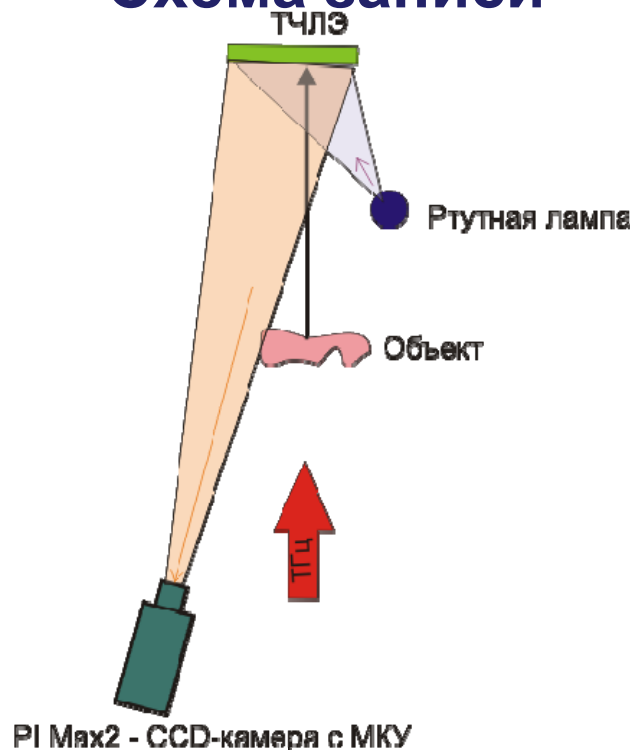
$$I_{THz} = \frac{I_0 - I_1}{I_1 - (I_{noise\ bgrd} + I_{noise\ CCD})}$$



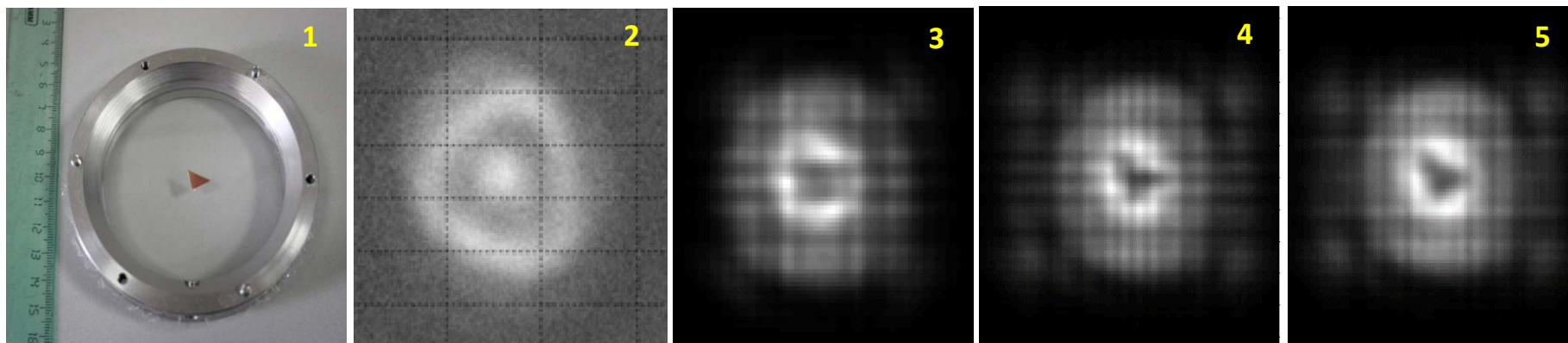
# Голография по схеме Габора - 3



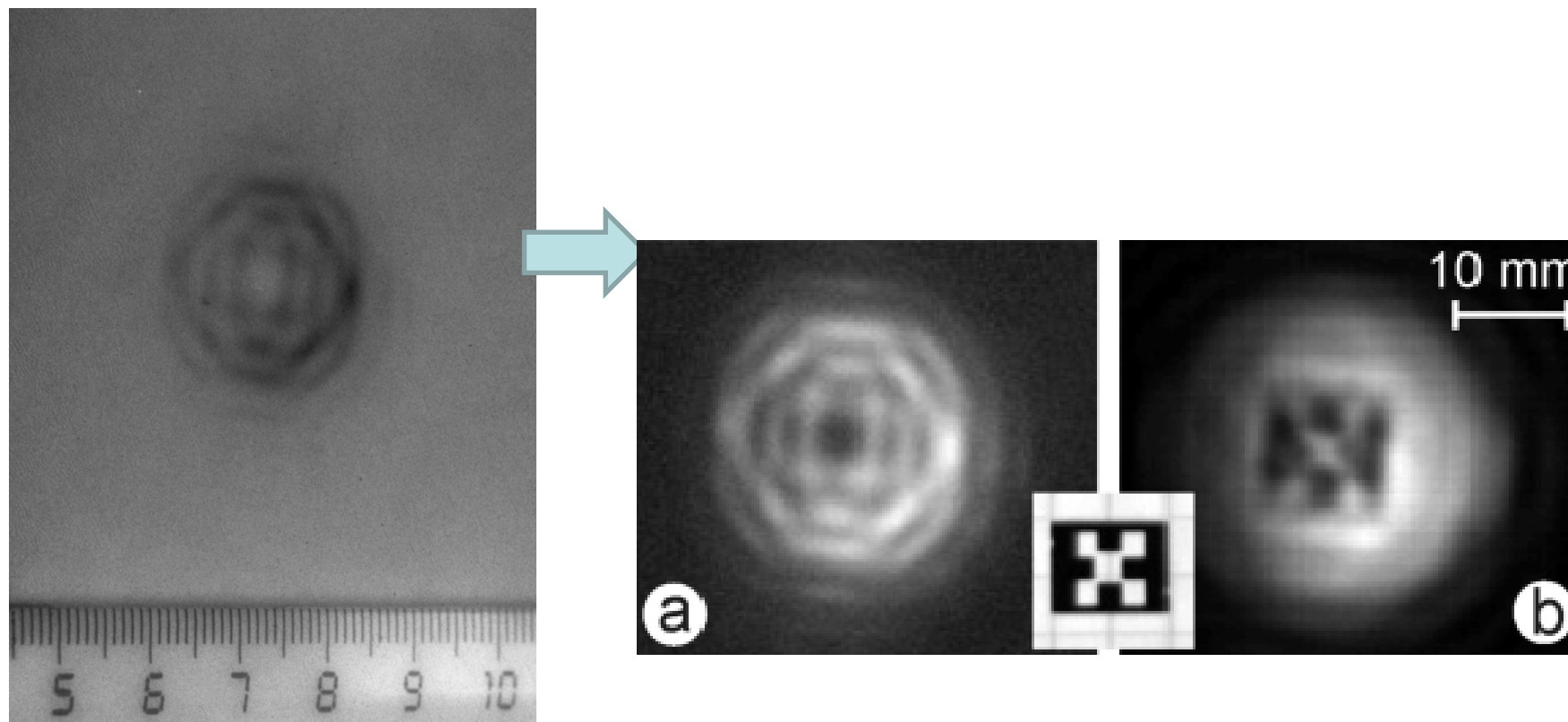
## Схема записи



Объект  
(медный треугольник на полипропиленовой подложке) (рис 1)  
и одна из голограмм (рис 2)  
Восстановление одной голограммы  $(6/5)L$  (рис 3) и  $L$  (рис 4).  
Усреднение пяти голограмм (рис 5)



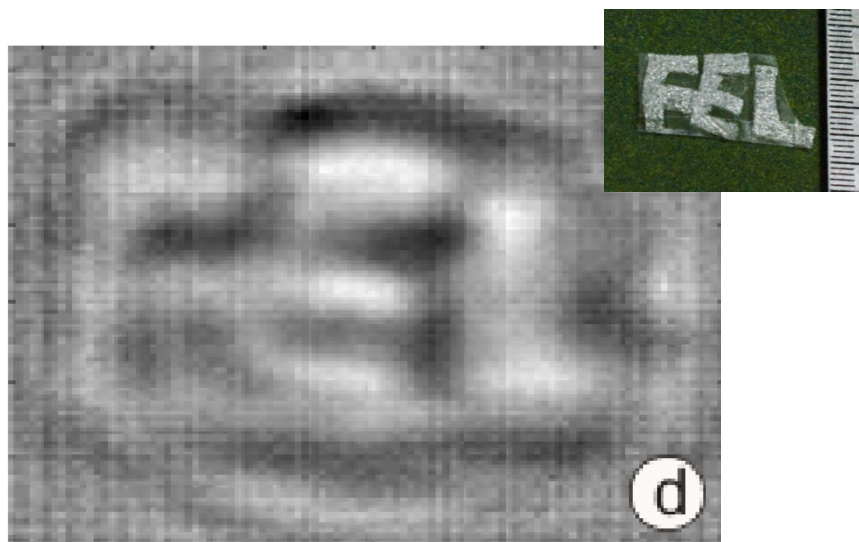
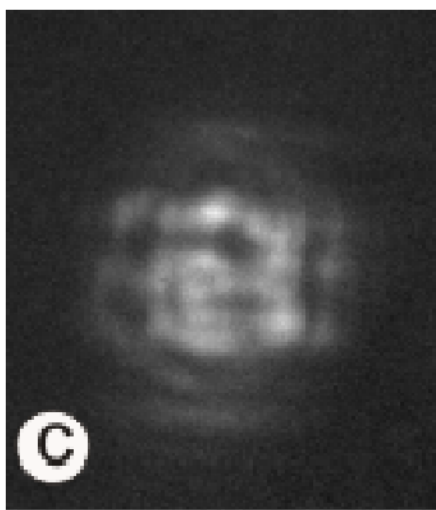
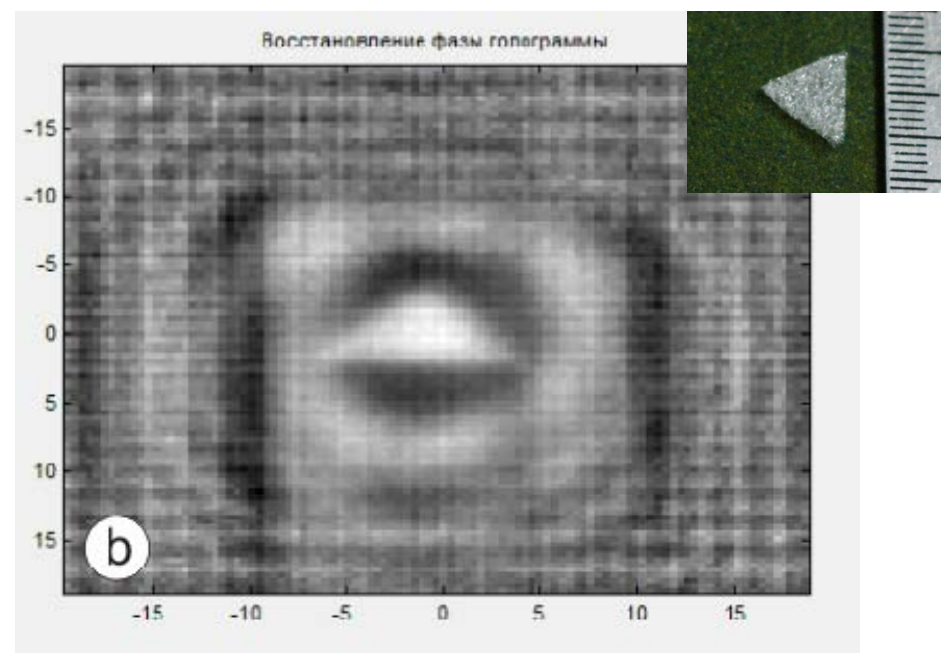
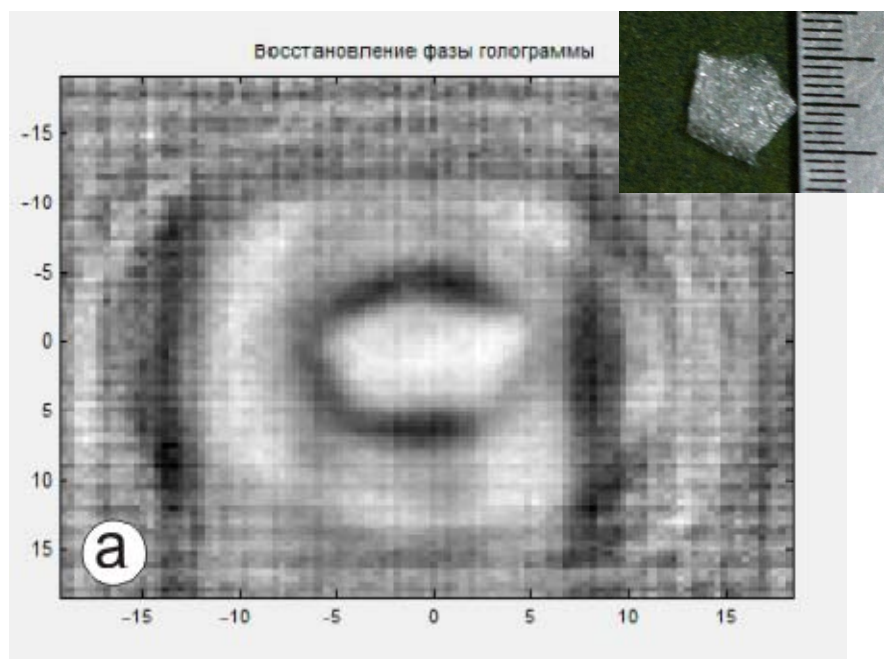
# Голография по схеме Габора - 4



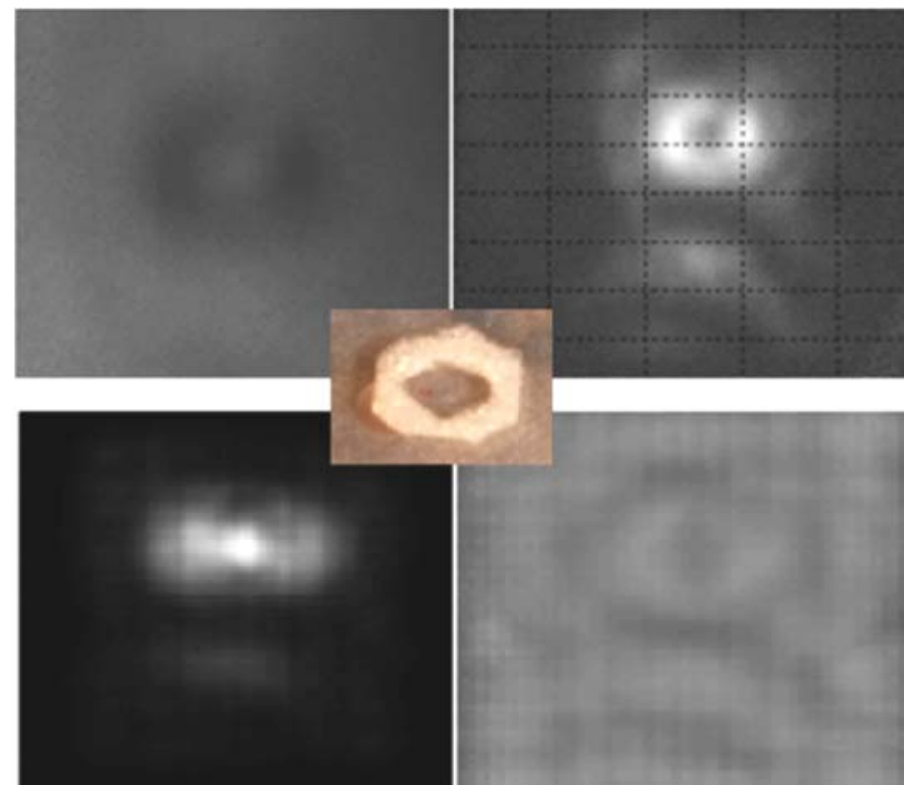
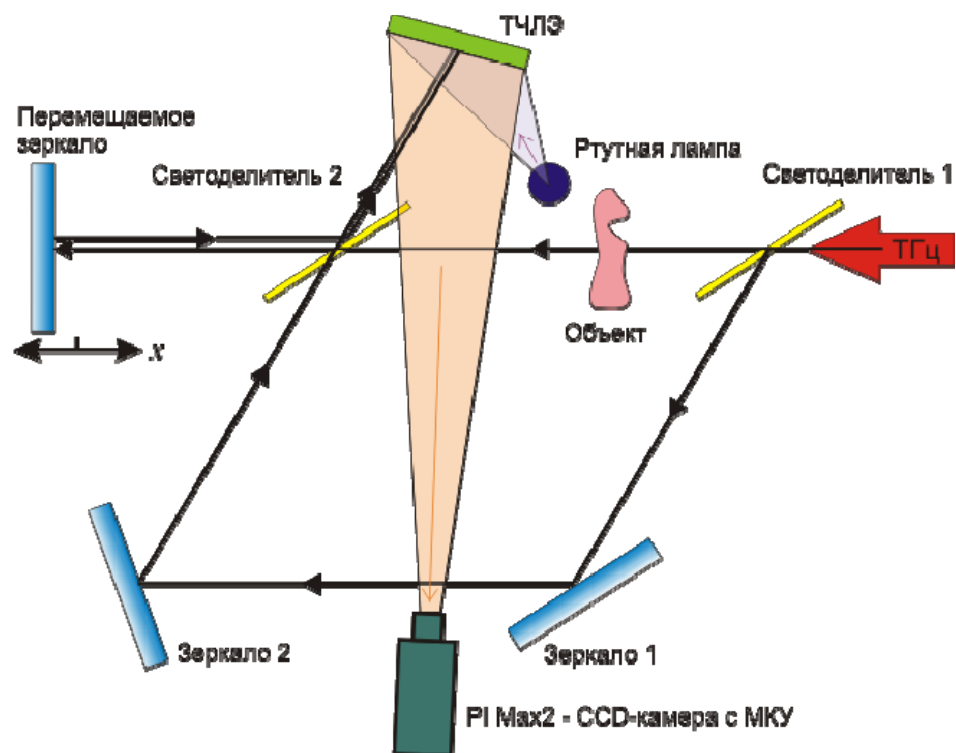
Фотография люминесцентного экрана. Темные области соответствуют участкам экрана, на которые падало терагерцовое излучение.

(а) Голограмма получена вычитанием матриц изображений люминесцентного экрана до и после экспонирования.  
(б) восстановленный численно объект методом вычисления интеграла Френеля-Кирхгофа

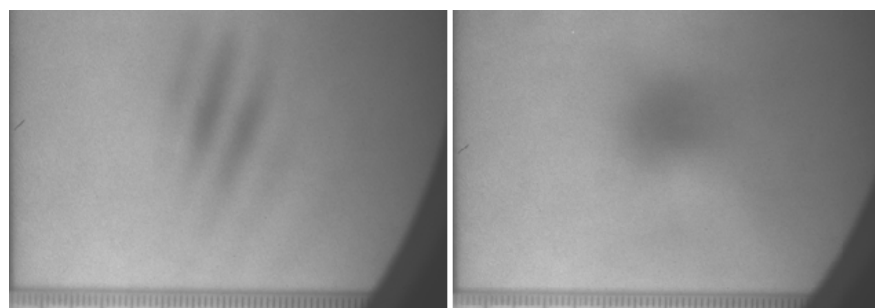
# Восстановленные изображения фазовых объектов



# Голография с осевым опорным пучком

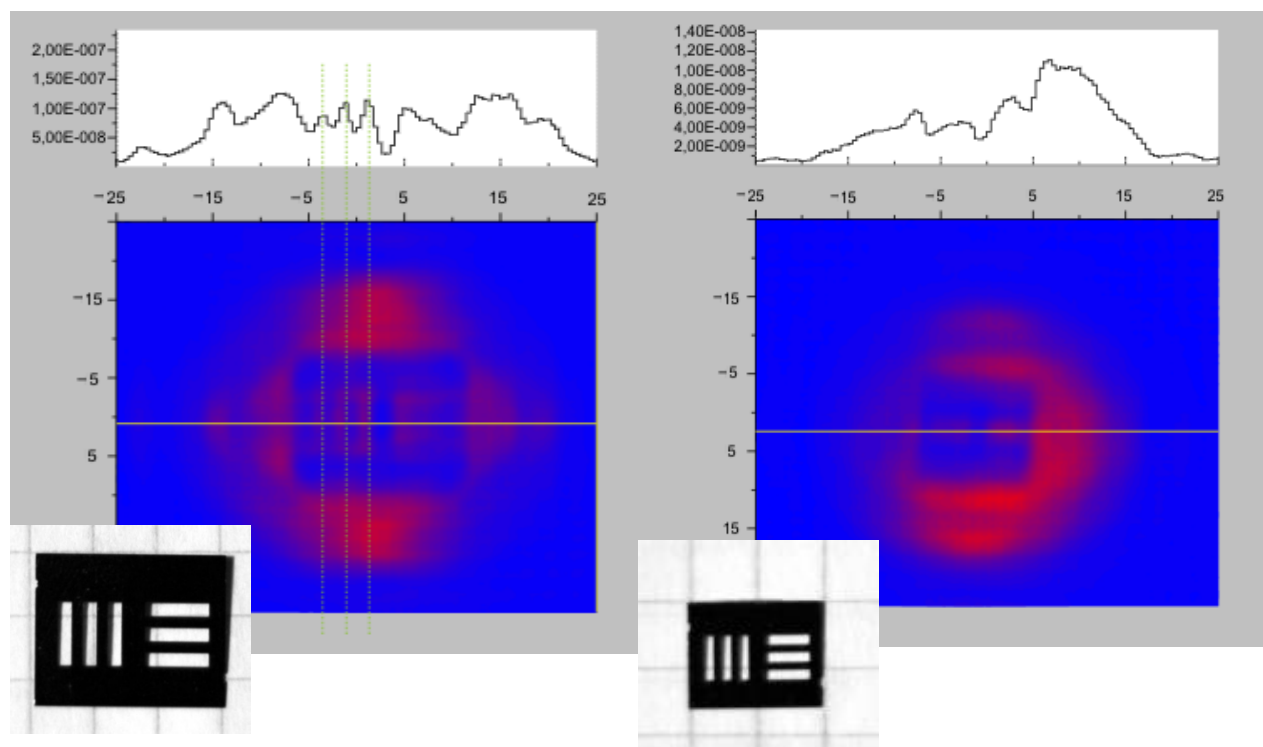


Фотография с ПЗС камеры, голограмма, восстановленная амплитуда и восстановленная фаза объекта на расстоянии 430 мм, на вставке фотография фазового объекта размером 15x10 мм.



Интерференционные картины, полученные на ТЧЛЭ и снятые ПЗС камерой. Слева - четыре интерференционные полосы, справа - нулевая

# Разрешающая способность - 1

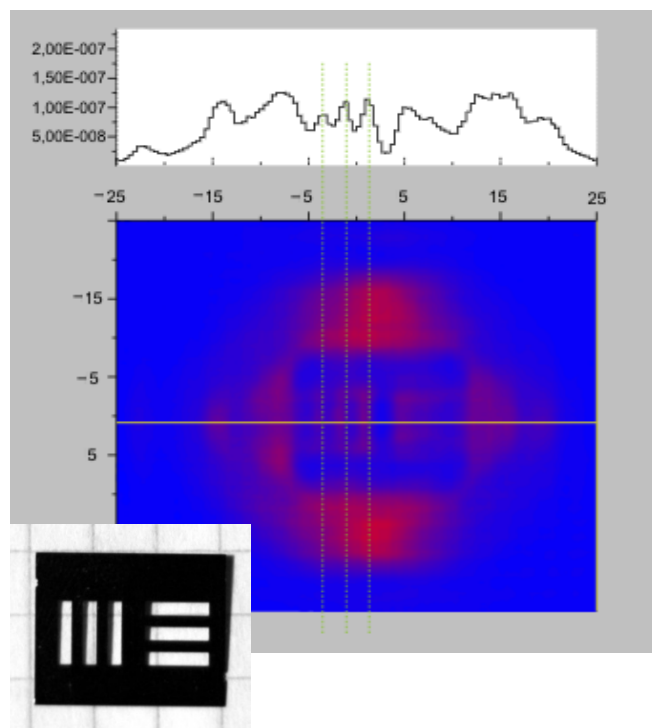


Восстановленные голограммы двух мир.  
 Разрешающая способность  
 голографической системы ограничена  
 волновым пределом и теплопроводностью  
 экрана (0.25 мм).

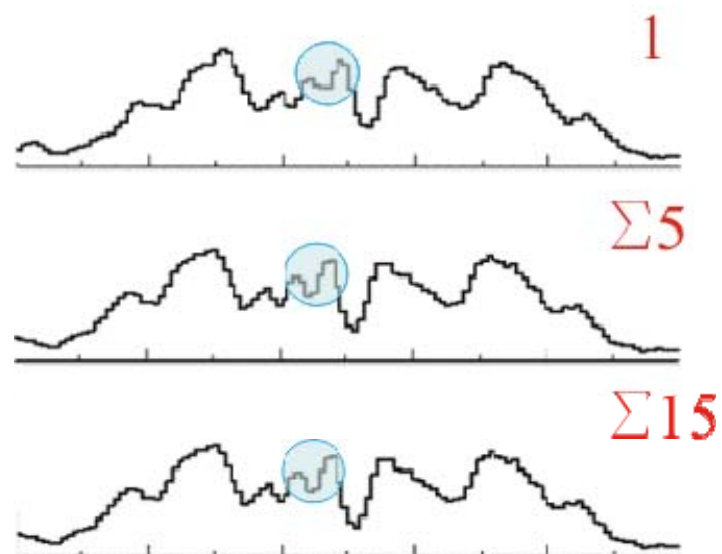
**В восстановленных голограммах шаг по пространственной координате равен 0.4 мм/пиксел.**



## Разрешающая способность - 2



Суммирование индивидуально восстановленных голограмм позволяет улучшить изображение



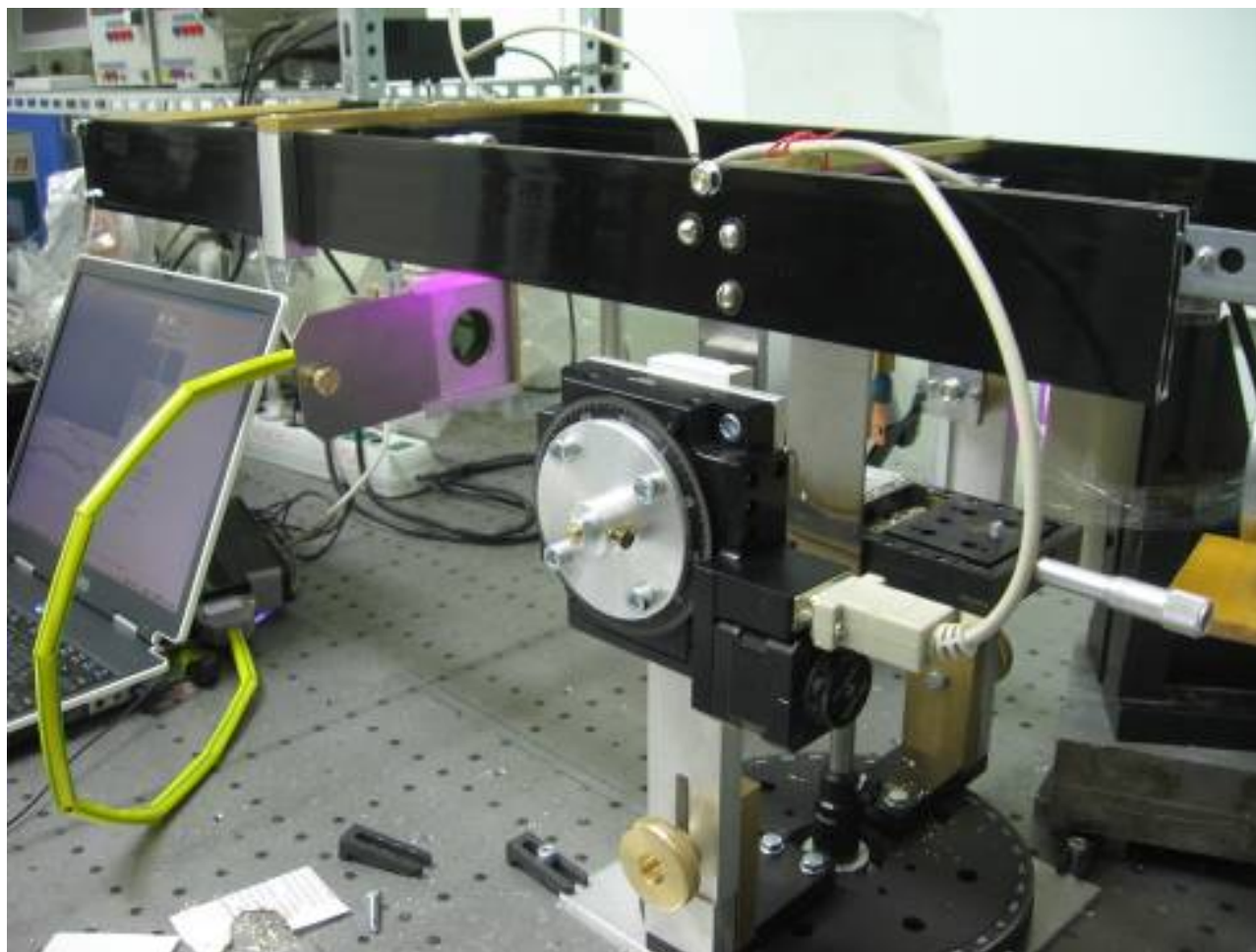
**В восстановленных голограммах шаг по пространственной координате равен 0.4 мм/пиксел.**

## Выводы

- Используя монохроматическое излучение лазера на свободных электронах, были впервые реализованы классические голографические схемы в терагерцовом диапазоне
- Созданы две оптические системы - для записи осевых голограмм и голограмм с опорным пучком
- Для записи голограмм в терагерцовом диапазоне впервые использованы термочувствительные люминесцентные экраны
- При численном восстановлении голограмм амплитудных объектов, записанных по схеме Габора, получено пространственное разрешение 0.4 мм при длине волны 0.13 мм

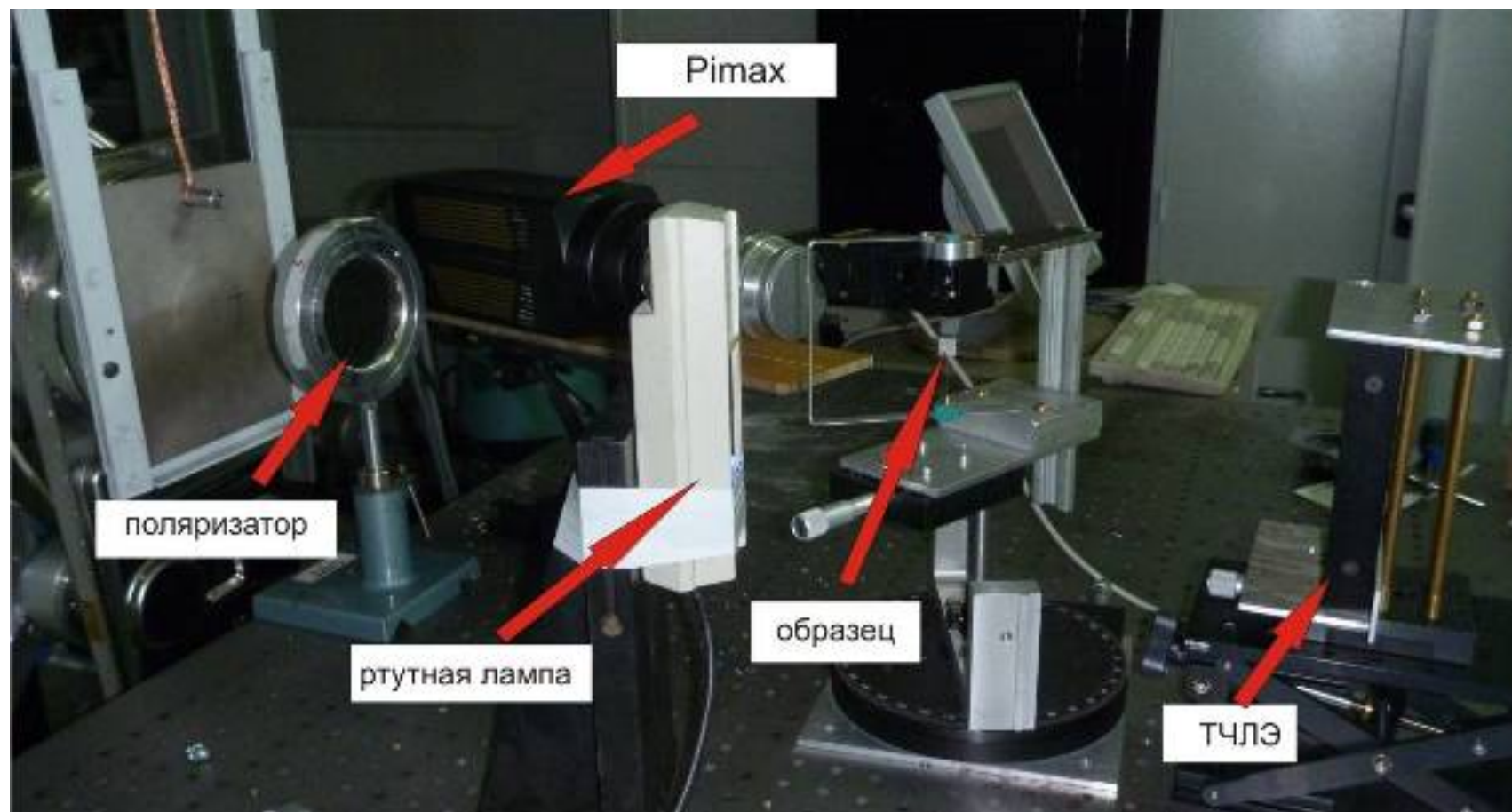
# *Томография*

## Томография на НЛСЭ - 1



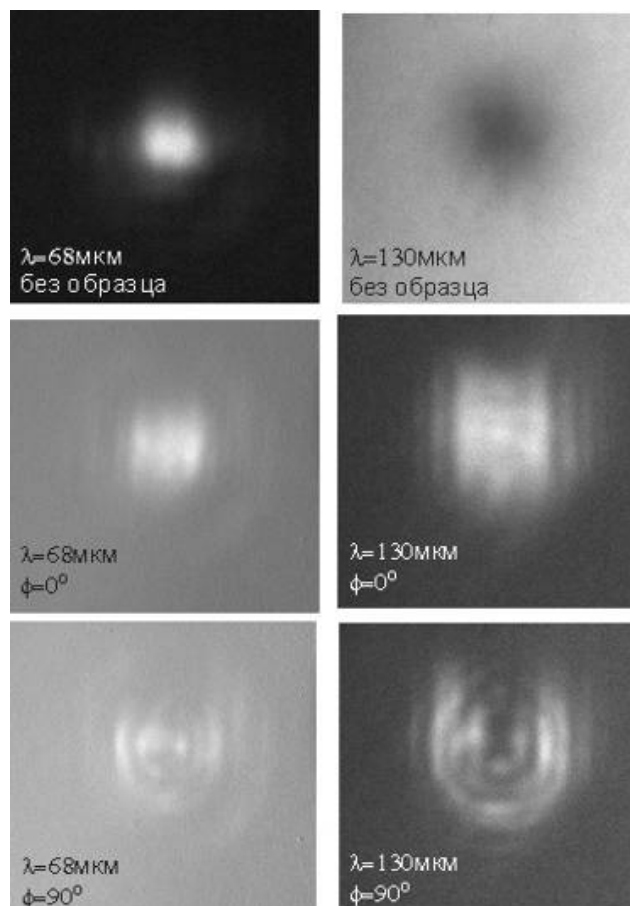
Установка №1 для записи томографических проекций с позиционерами, управляемыми от компьютера; регистратор излучения ММП, при необходимости заменяемый ТЧЛЭ

## Томография на НЛСЭ - 2



Экспериментальная установка №2 с записью изображений с помощью ТЧЛЭ

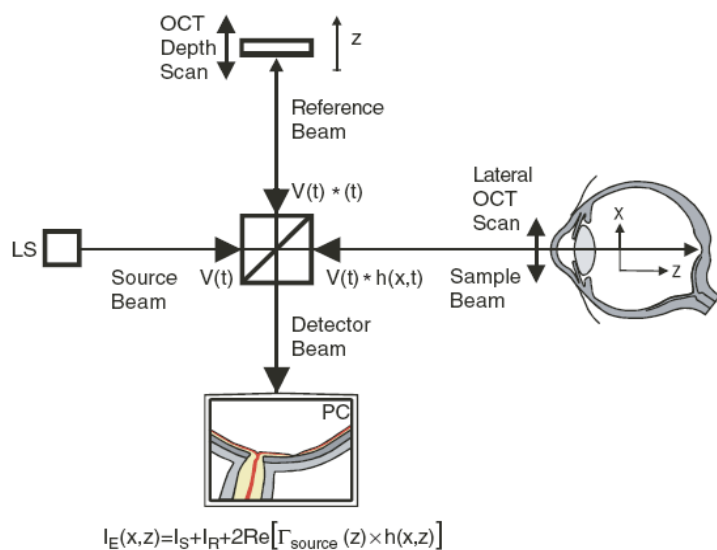
## Томография на НЛСЭ - 3



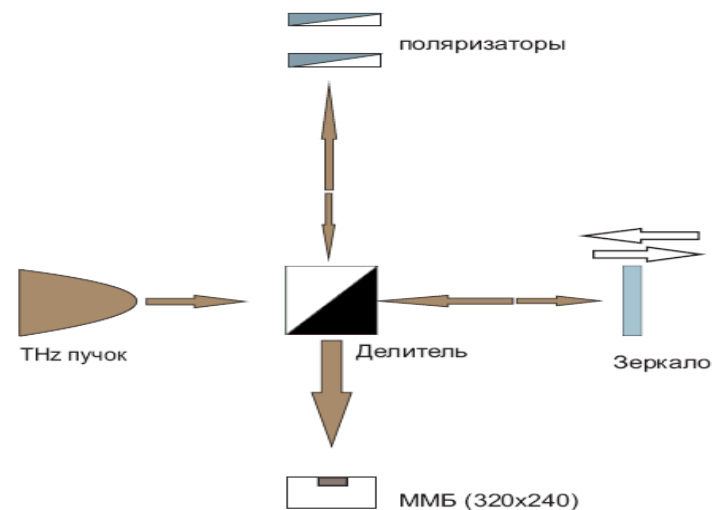
Примеры записи томографических проекций амплитудного транспаранта (тонкая медная фольга с прорезанной буквой Г) на двух длинах волн. Вверху – пучок лазера; далее изображения, записанные ТЧЛЭ при двух положениях транспаранта (0 градусов –

# Оптическая когерентная томография

# Оптическая когерентная томография на НЛСЭ - 1



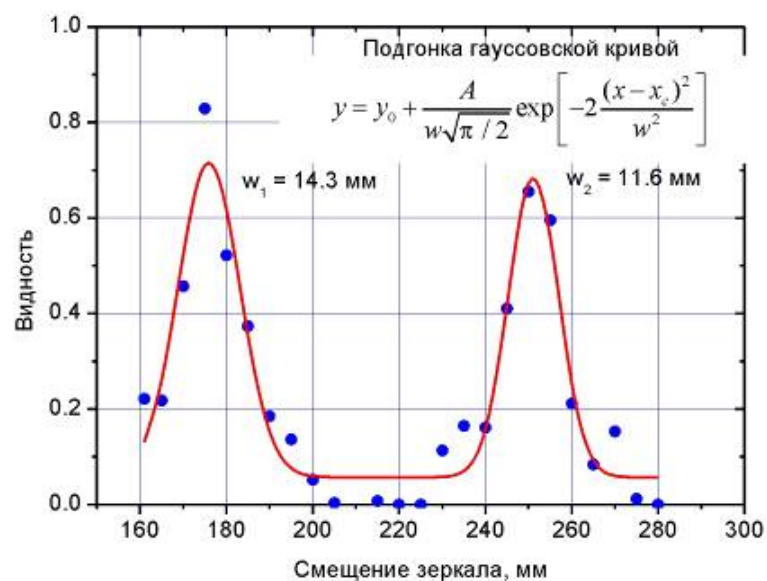
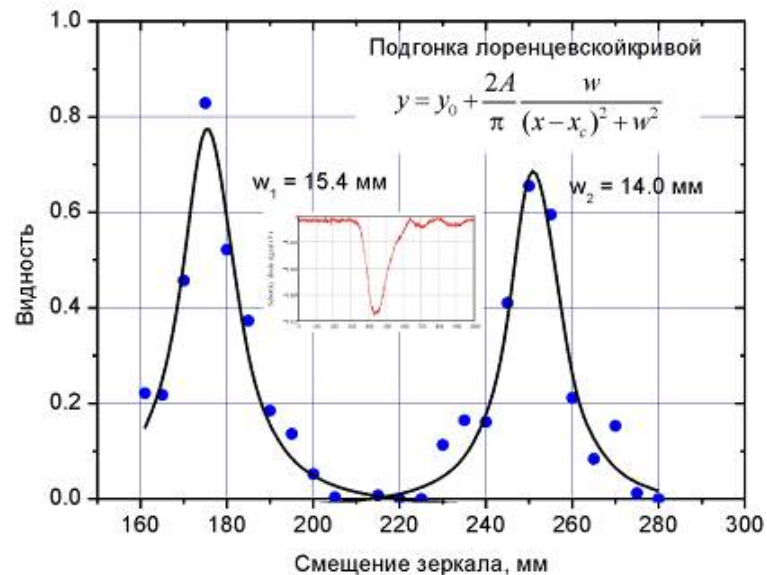
Пример системы ОКТ  
для исследования  
структуры глаза в  
видимом диапазоне



Модельная система  
для демонстрации ОКТ  
с использованием  
терагерцового  
лазера на свободных  
электронах



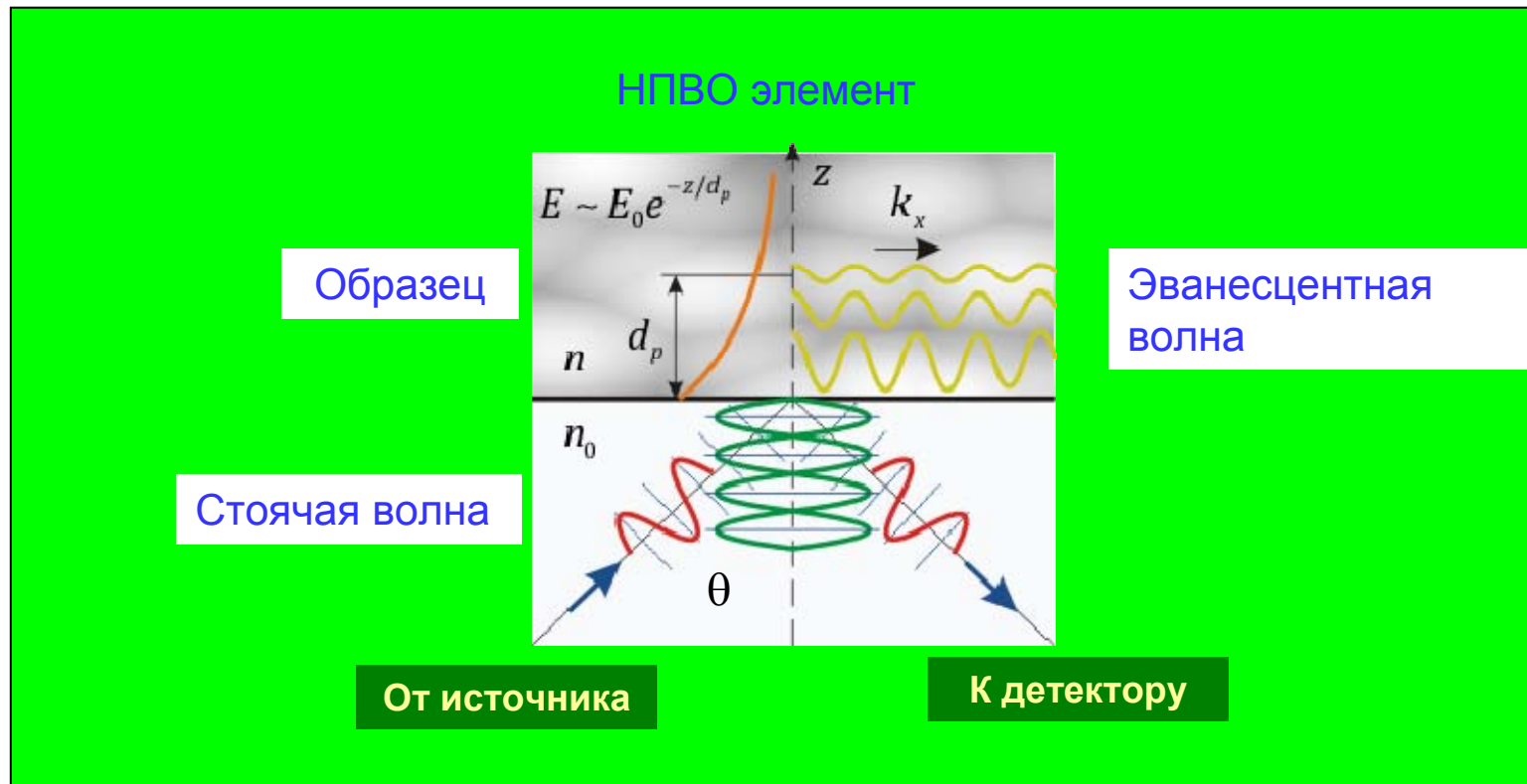
# Оптическая когерентная томография на НЛСЭ - 2



Точки на графиках –  
 видность  
 интерференционной  
 картины,  
 наблюдаемой при  
 перемещении  
 зеркала в  
 интерферометре  
 Майкельсона с двумя  
 поляризаторами в  
 рабочем плече

# Спектроскопия нарушенного полного внутреннего отражения

# Нарушенное полное внутреннее отражение (НПВО)



$$\theta_c = \arcsin(n_2 / n_1)$$

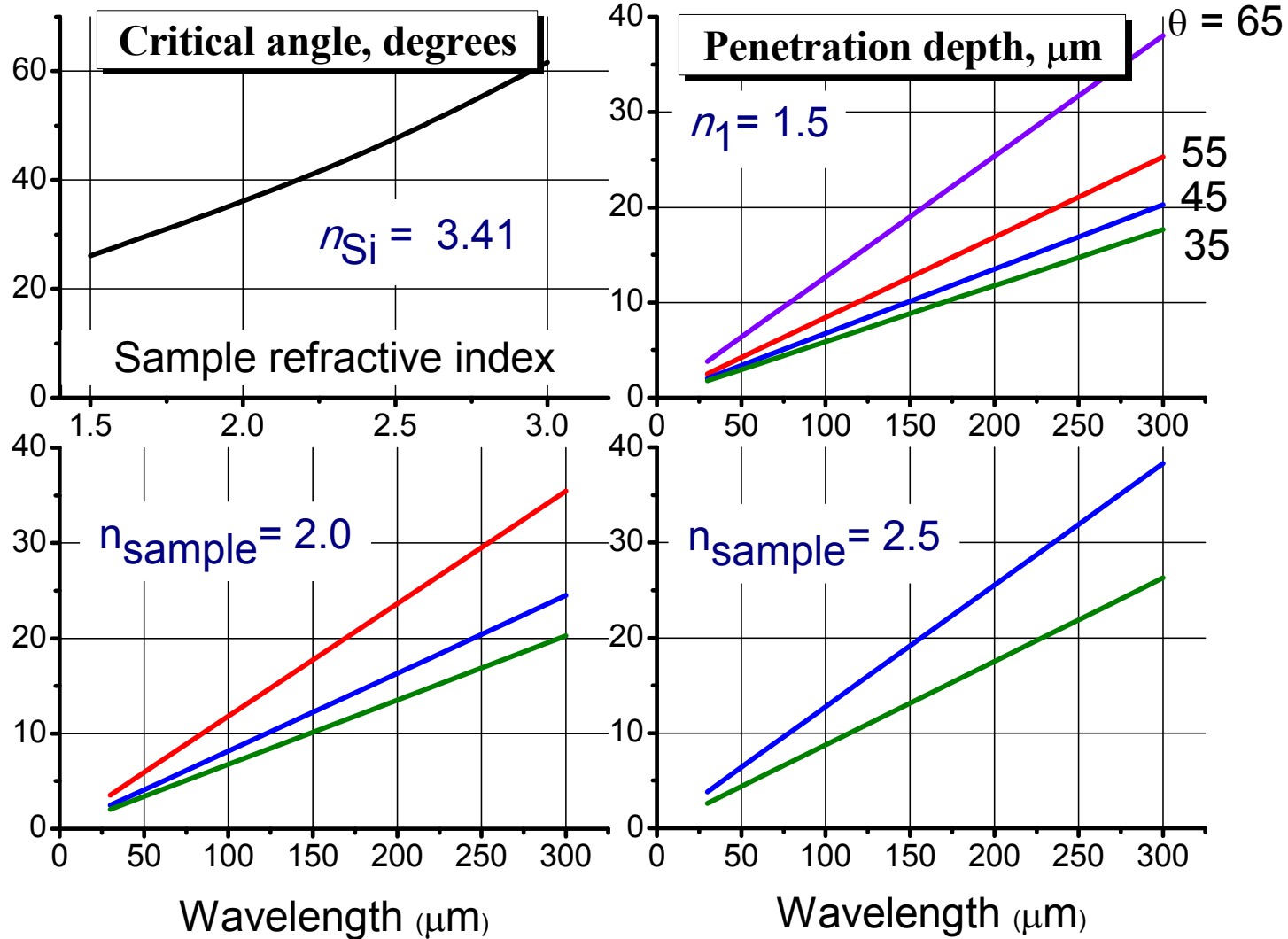
Критический угол

$$d_p = \frac{\lambda}{2\pi n_1 \sqrt{\sin^2 \theta - (n_2 / n_1)^2}}$$

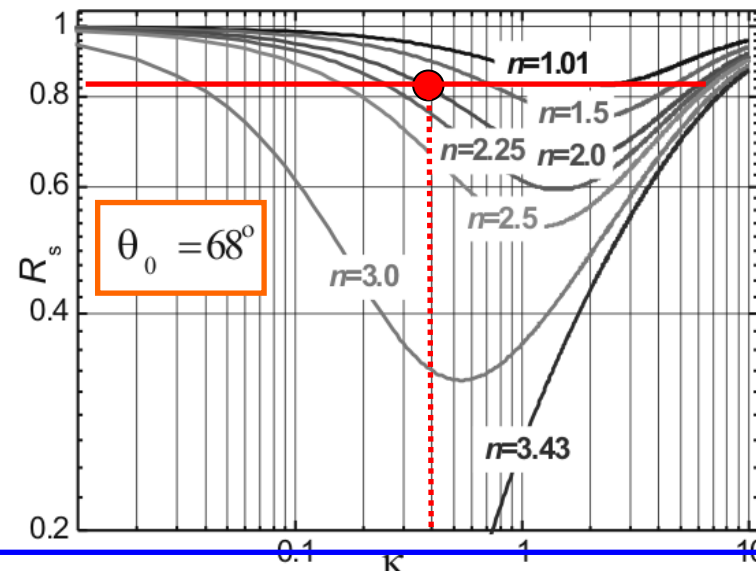
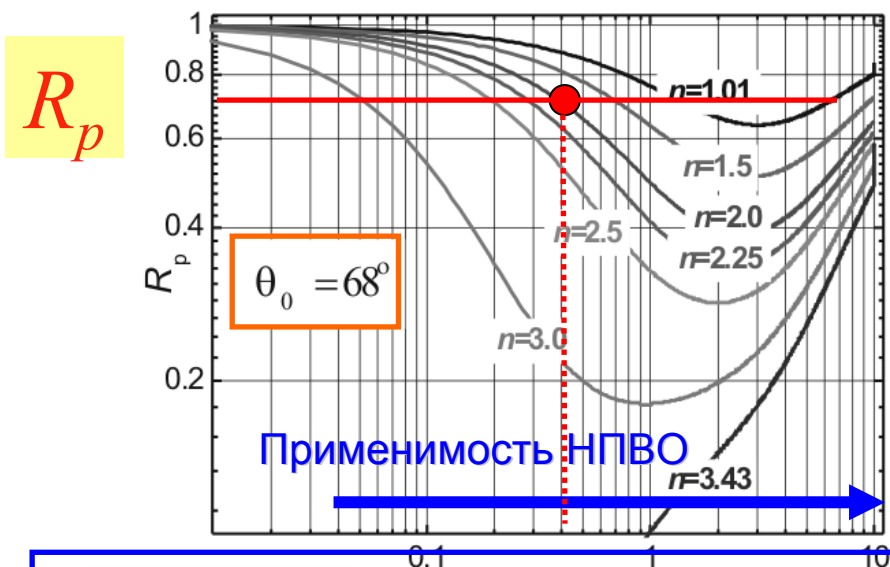
Глубина проникновения

# Нарушенное полное внутреннее отражение (НПВО)

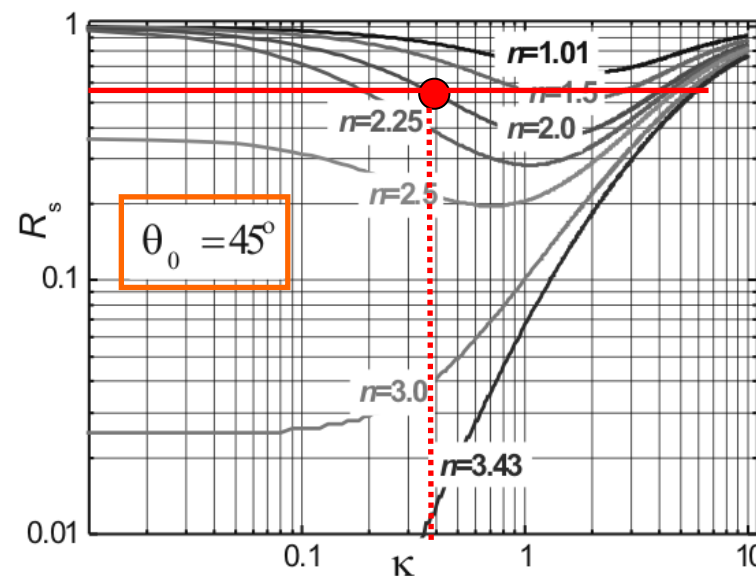
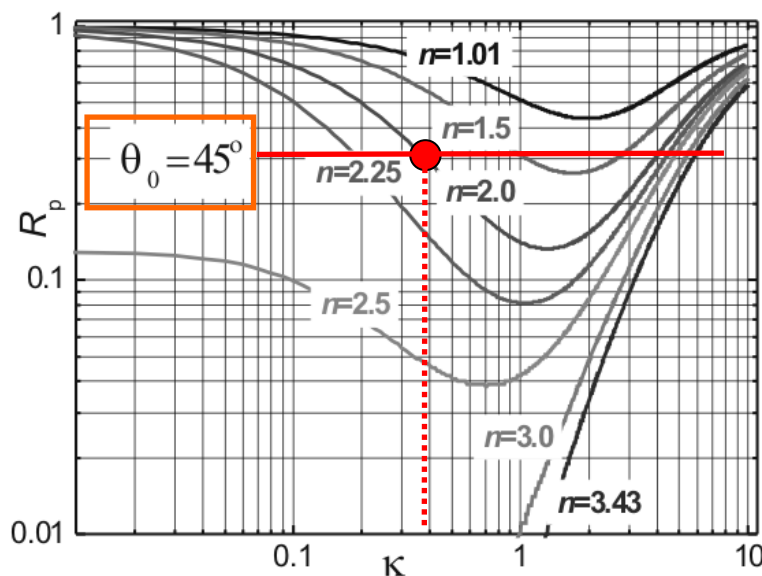
Глубина проникновения



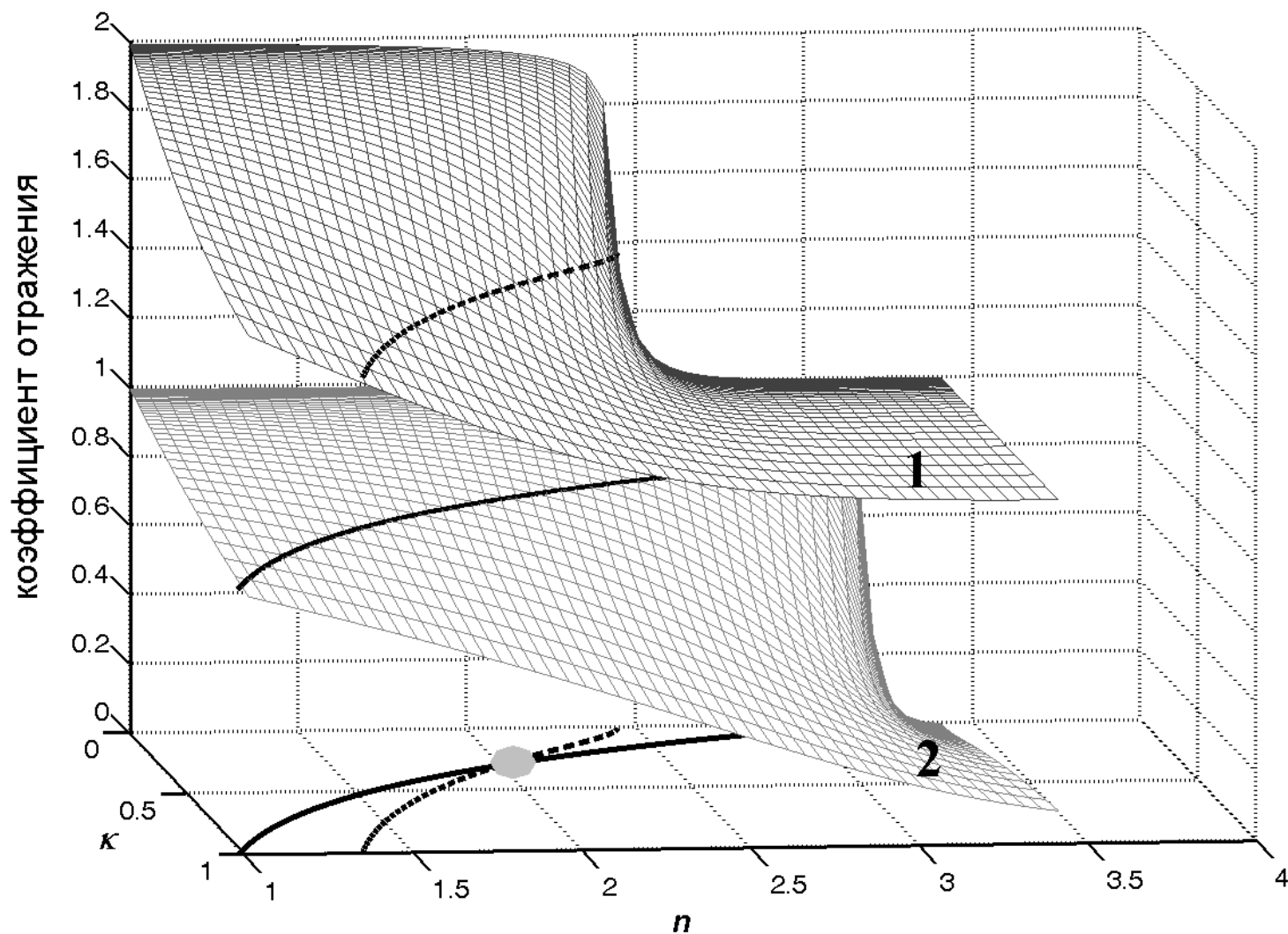
# Внутреннее отражение от раздела сред "Si призма - образец" при различных комплексных показателях преломления



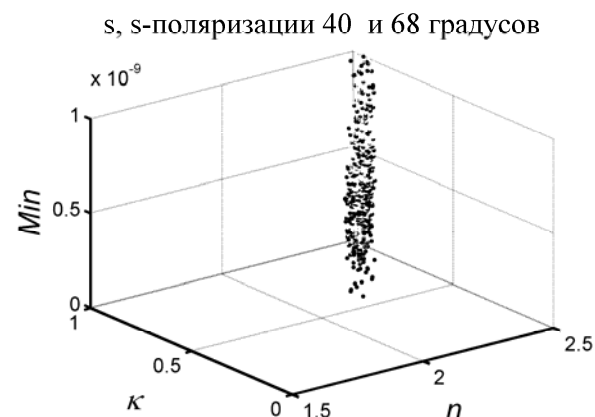
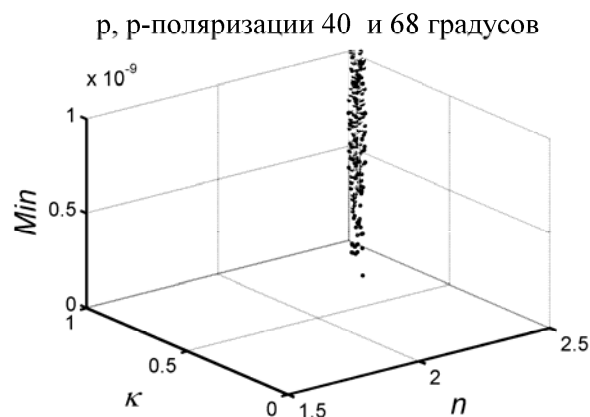
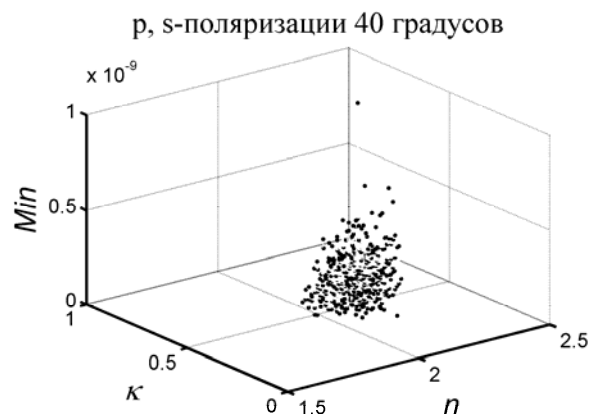
$\{ n , \kappa \}$  определяется по двум измеренным коэффициентам отражения



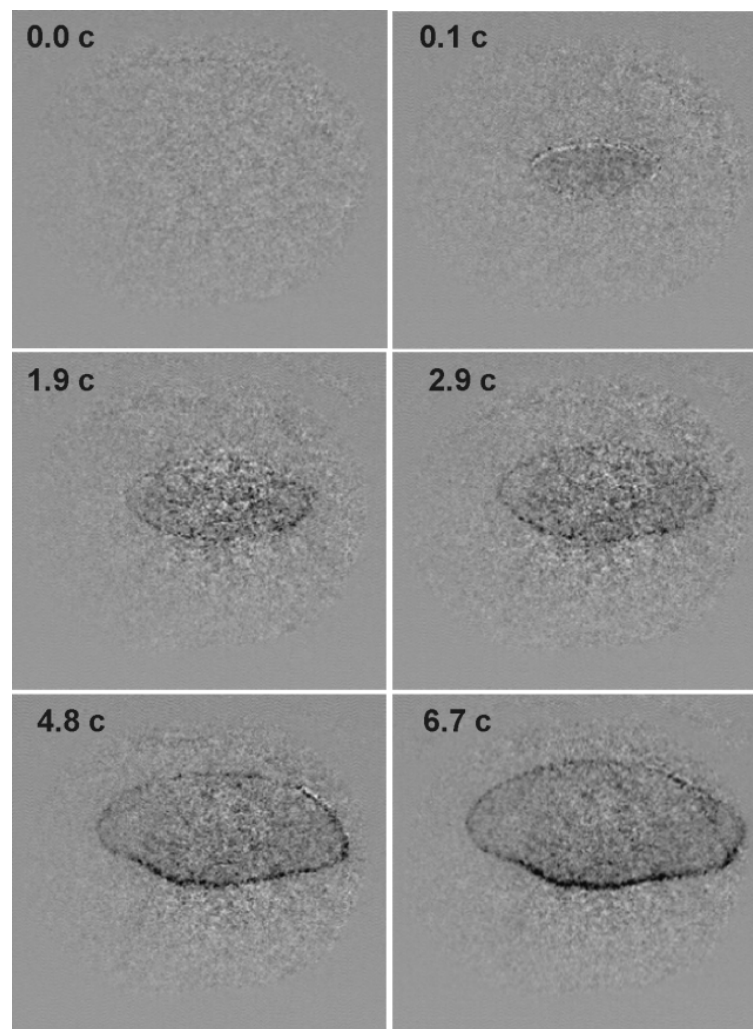
# Как определяют $\kappa$ и $\mu$ методом НТВО



# Наиболее точные результаты получаются при использовании р-поляризации и двух углов падения



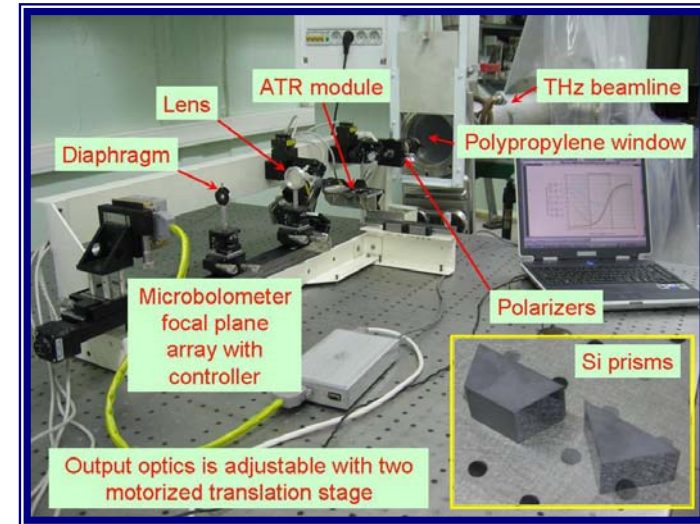
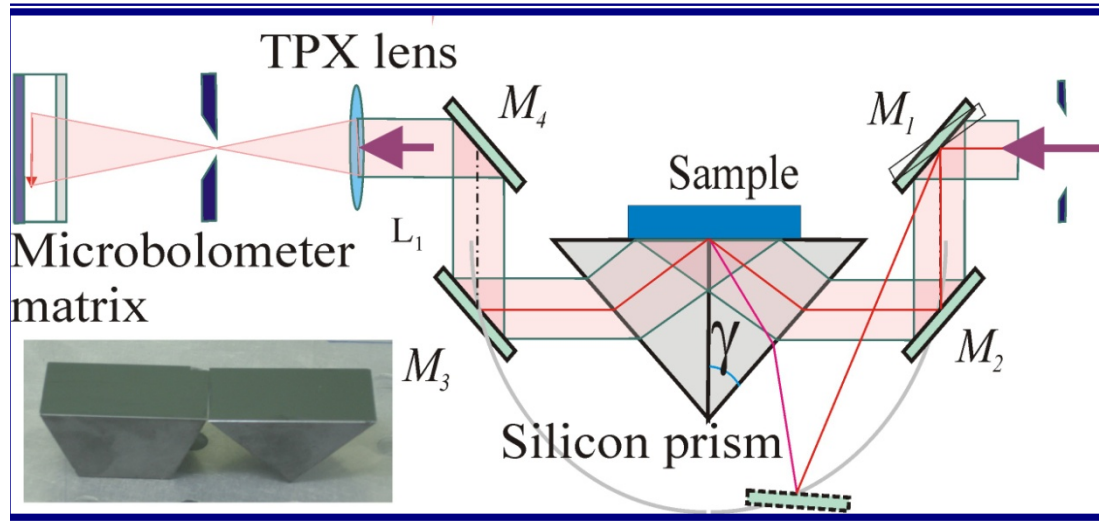
НПВО-изображение в видимом диапазоне:  
падение капли раствора 6-аминофенола на  
поверхность стеклянной призмы ( $\lambda = 532$  нм)





# Первый изображающий ТГц ИТВО-спектрометр

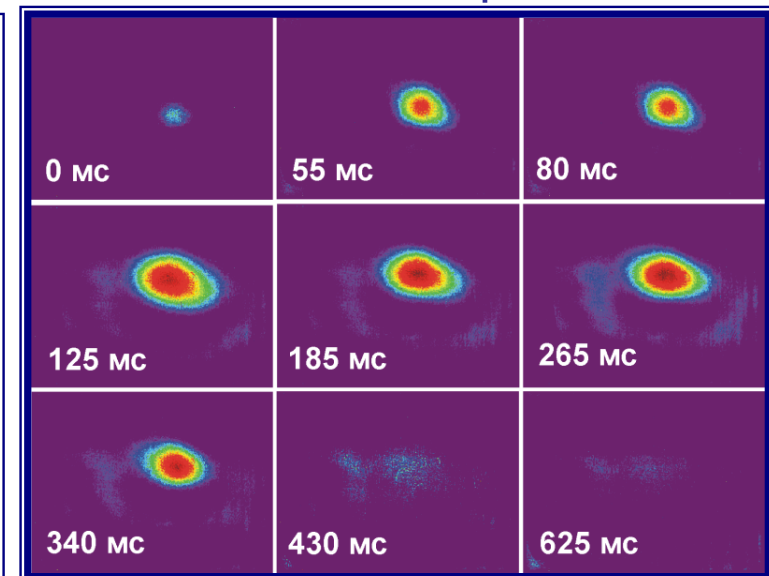
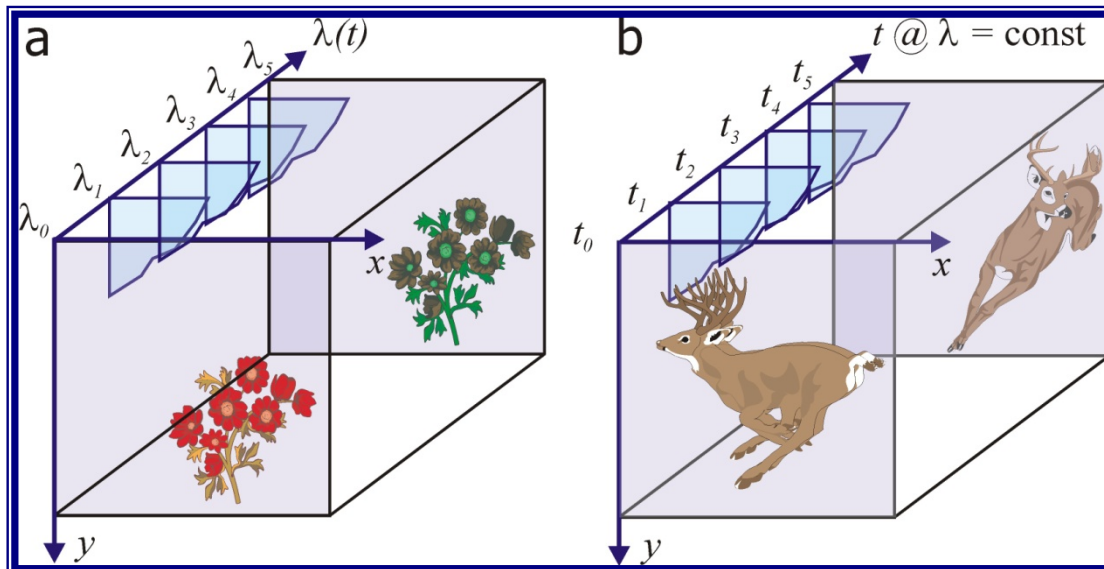
Пример: динамика растворения капли этанола в тонком слое воды



Two modes of operation

(V. Gerasimov, paper 5-14)

Ethanol droplet dilution



# Исследование сахаридов оптическими методами

Коммерчески доступные моно-, олиго- и полисахариды (Sigma, USA)

Название полисахарида
D-glucose
D-maltose
2-Desoxy-D-glucose
D-glucuronic acid (Na salt)
D-glucuronic acid
D-glucuronic acid (monohydrate)
D-glucosamine (HCl)
D-galactosamine (HCl)
N-Acetyl-D-galactosamine
Hyaluronic acid (K salt)
Chondroitin sulfate A (sodium salt)
Chondroitin sulfate C (sodium salt)
Chondroitin sulfate A+C (sodium salt)
Heparin sodium

спектры отражения в среднем и дальнем ИК-диапазонах

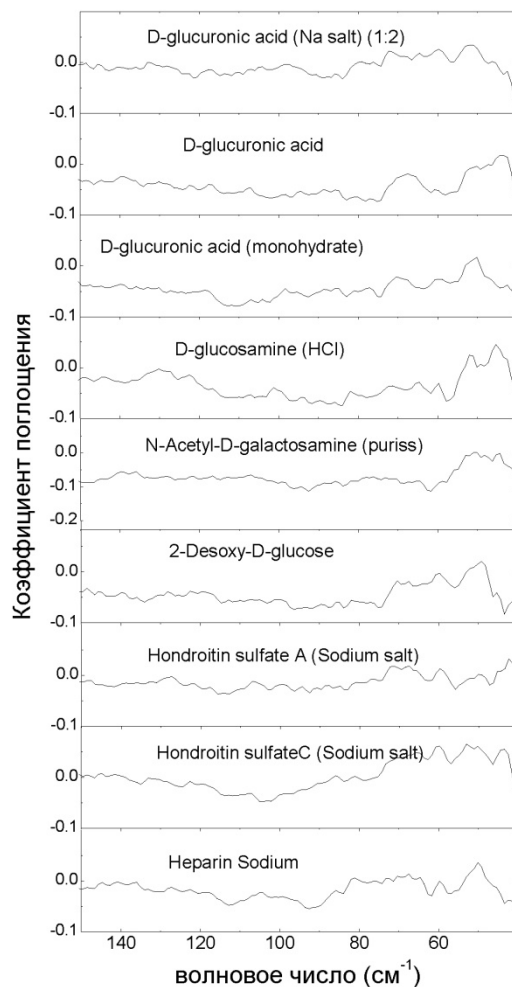
НПВО-модуль с 45-градусным кремниевым кристаллом на фурье-спектрометрах фирмы Bruker

оптическая активность

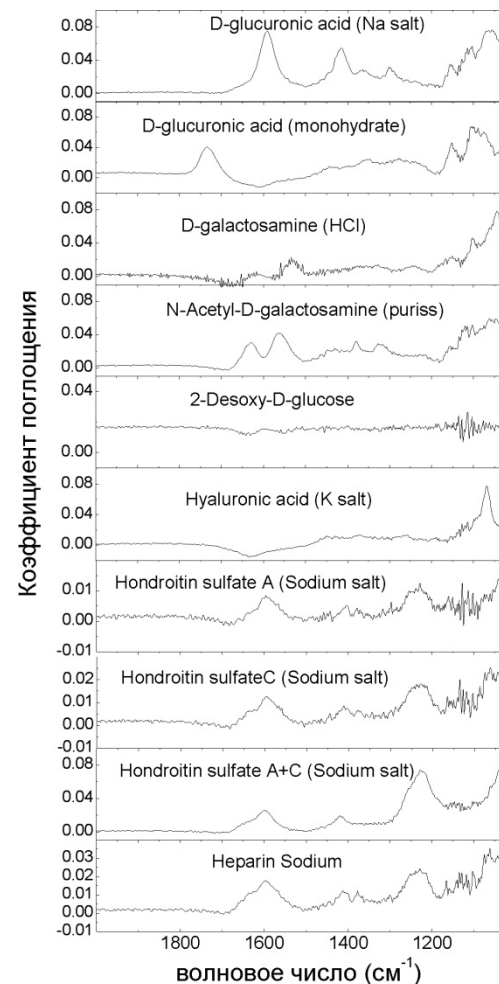
- лазерный эллипсометр ЛЭФ-3М, работающий по схеме PCSA (длина волны  $\lambda=632.8$  нм)
- спектральный эллипсометр статического типа

# Спектры отражения полисахаридов в водном растворе, измеренные с методом НПВО

## дальний инфракрасный диапазон



## средний инфракрасный диапазон



**Спектры полисахаридов имеют характерные пики как в среднем, так и дальнем ИК диапазоне**  
**Результаты измерений будут использованы в экспериментах по НПВО-поляриметрии в терагерцовом и среднем ИК-диапазоне на новосибирском ЛСЭ**

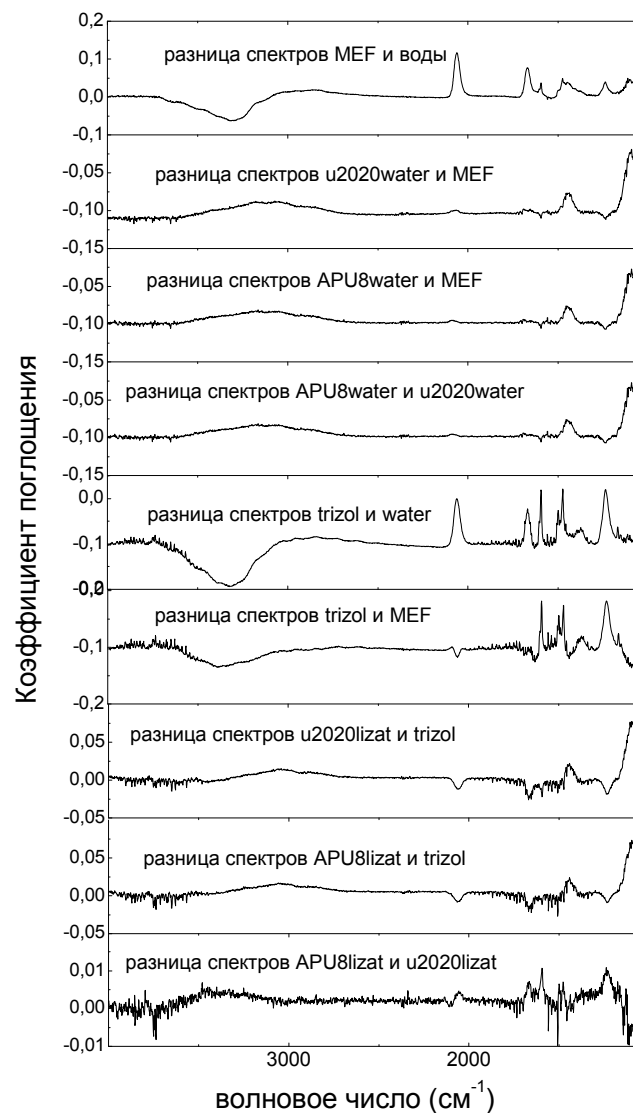
## Лизаты опухолевых клеток различных клеточных линий

(MEF, U2020, APU8),  
отличающиеся по степени  
модификации входящих в их  
состав полисахаридов  
(соотношение  
D-глюкуроновой и  
L-идуроновой кислот)

Наиболее перспективной  
может быть спектральная  
область  $1000-400\text{ см}^{-1}$ , которая  
в данном эксперименте не  
наблюдалась из-за полосы  
поглощения в кремниевой  
призме

## Спектры отражения лизатов опухолевых клеток в среднем ИК-диапазоне

НПВО-модуль на ФС Bruker Vector 22

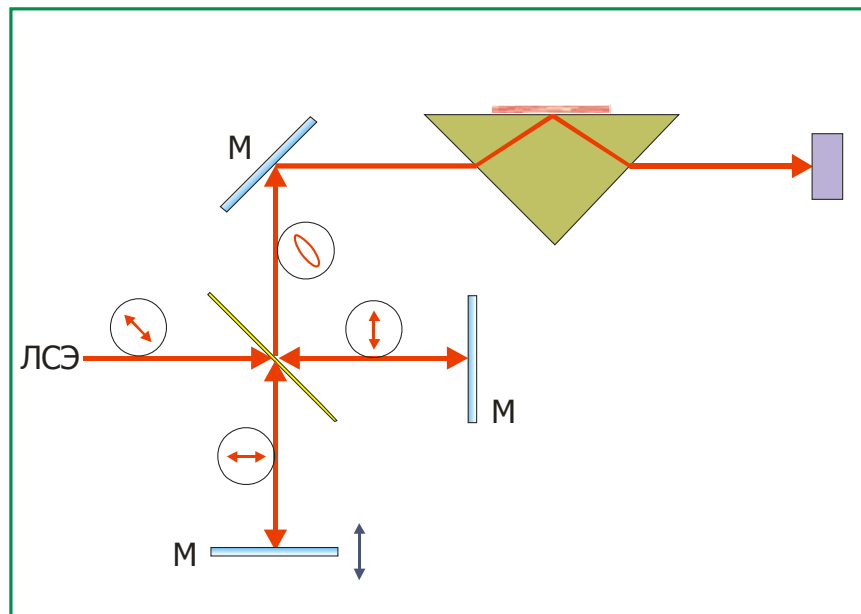
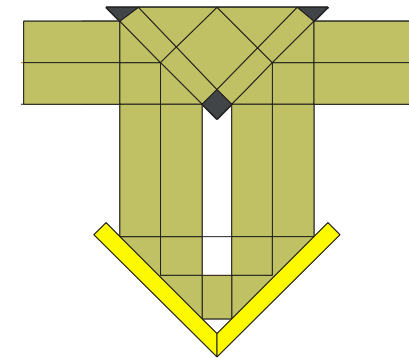


# НПВО спектрометр-поляриметр



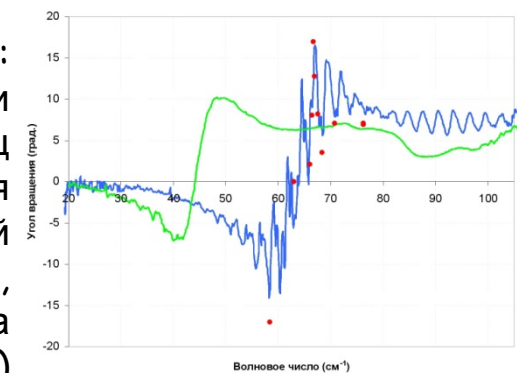
- Изображающий НПВО-спектрометр с ЛСЭ в качестве перестраиваемого источника излучения используется для прецизионного измерения действительной и мнимой части показателя преломления сред

- Разработан метод голографической записи изображения, позволяющий получать резкие изображения протяженных объектов, расположенных на поверхности призмы



- Модификация НПВО-спектрометра для исследования линейного и кругового дихроизма сильно поглощающих объектов, в частности полисахаридов и метаматериалов

- Эксперимент на ЛСЭ: Угол поворота плоскости поляризации ТГц излучения метаматериалами (синий на  $As_2S_3$  подложке, зеленый - спирали на кремниевой подложке)

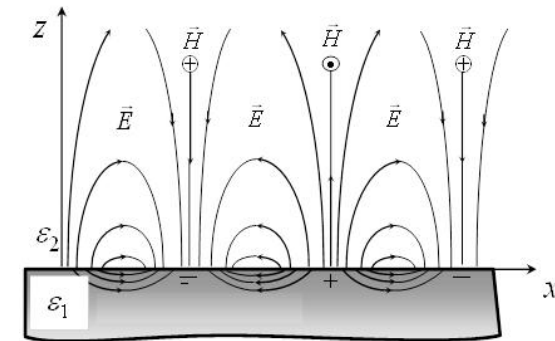


# *Поверхностные плазмон-поляритоны*

# Что такое поверхностный плазмон-поляритон (ППП)

**Поверхностный плазмон** – это комбинация неоднородной ТМ-волны и волны индуцированных свободных зарядов, распространяющихся вдоль проводящей поверхности;

Поверхностный плазмон (или поверхностная электромагнитная волна – ПЭВ) существует только на границах раздела сред с разными знаками диэлектрической проницаемости

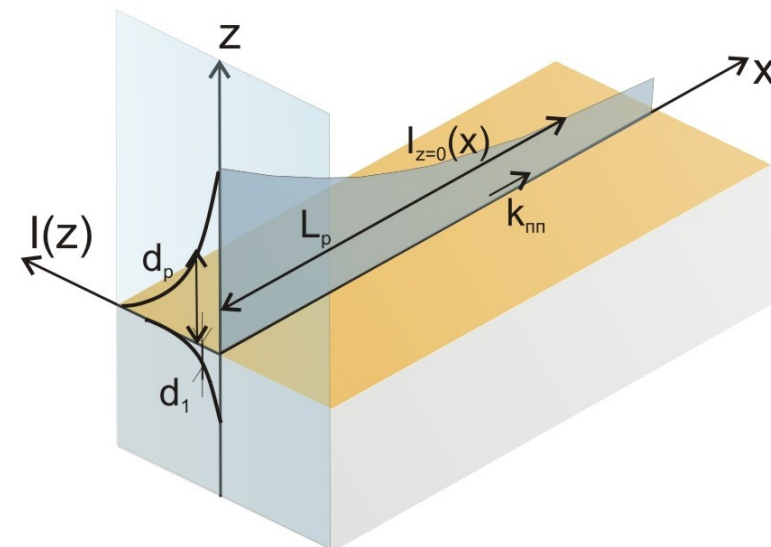


## Основные характеристики:

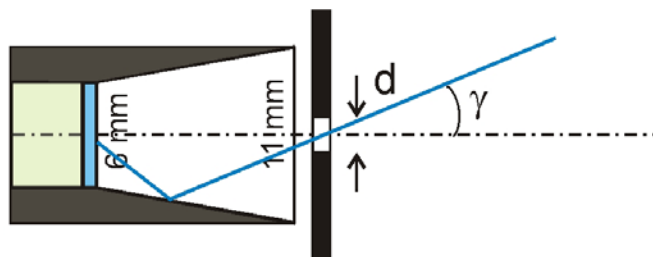
- Волновой вектор  $k_{\text{пп}}$
- Глубина проникновения  $d_p$
- Длина пробега  $L_p$

## Возможные применения ППП в ТГц диапазоне:

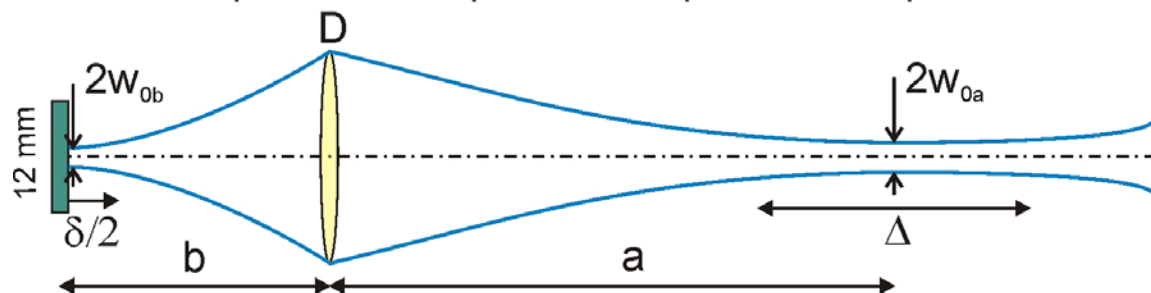
- Исследование проводящих поверхностей
- Спектроскопия тонких слоев на проводниках
- Системы связи и передачи данных



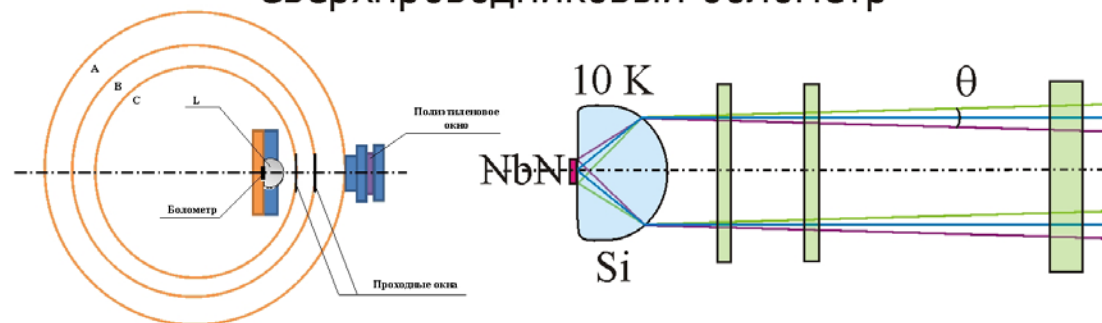
### Акусто-оптический детектор



### Матричный микроболометрический приемник



### Сверхпроводниковый болометр

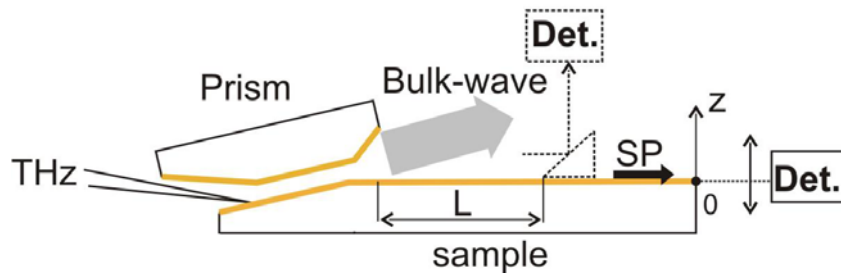




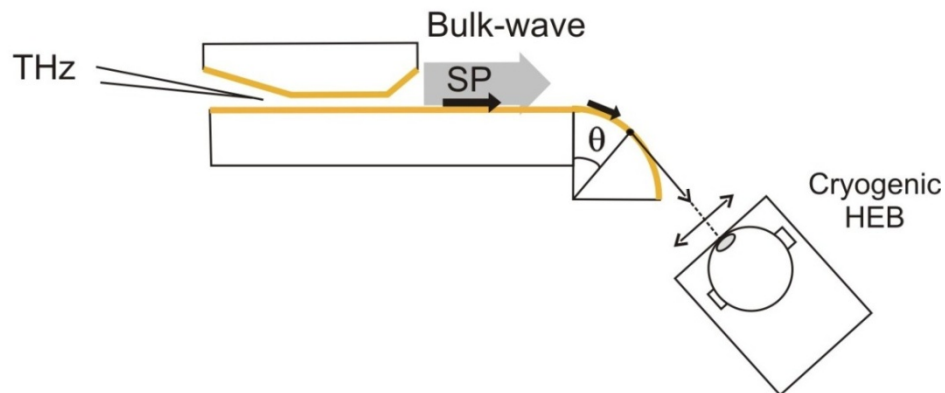
# Исследование ППП на интерфейсе золото-диэлектрик-воздух

## Схемы экспериментов:

### а. Исследование ППП на длине пробега



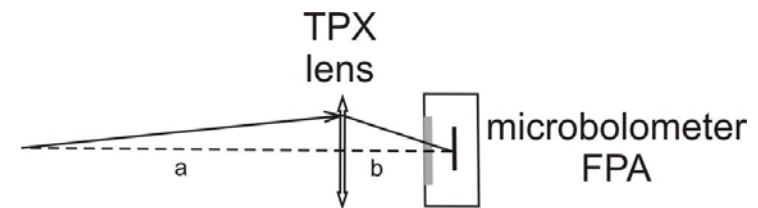
### б. Исследование распространения ППП по изогнутой поверхности $\theta$



## Методы измерений:

### 1. Изображающая система

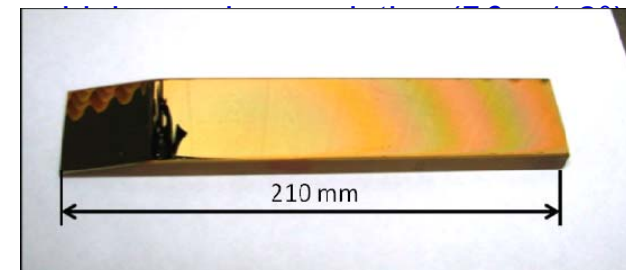
Линза ТРХ и матричный микроболометрический приемник



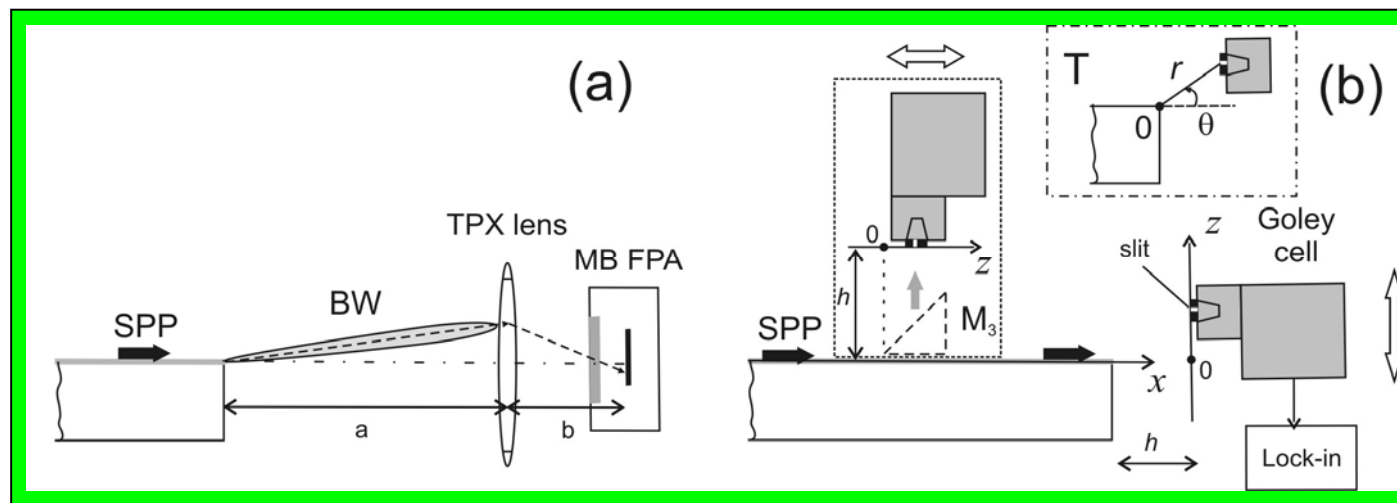
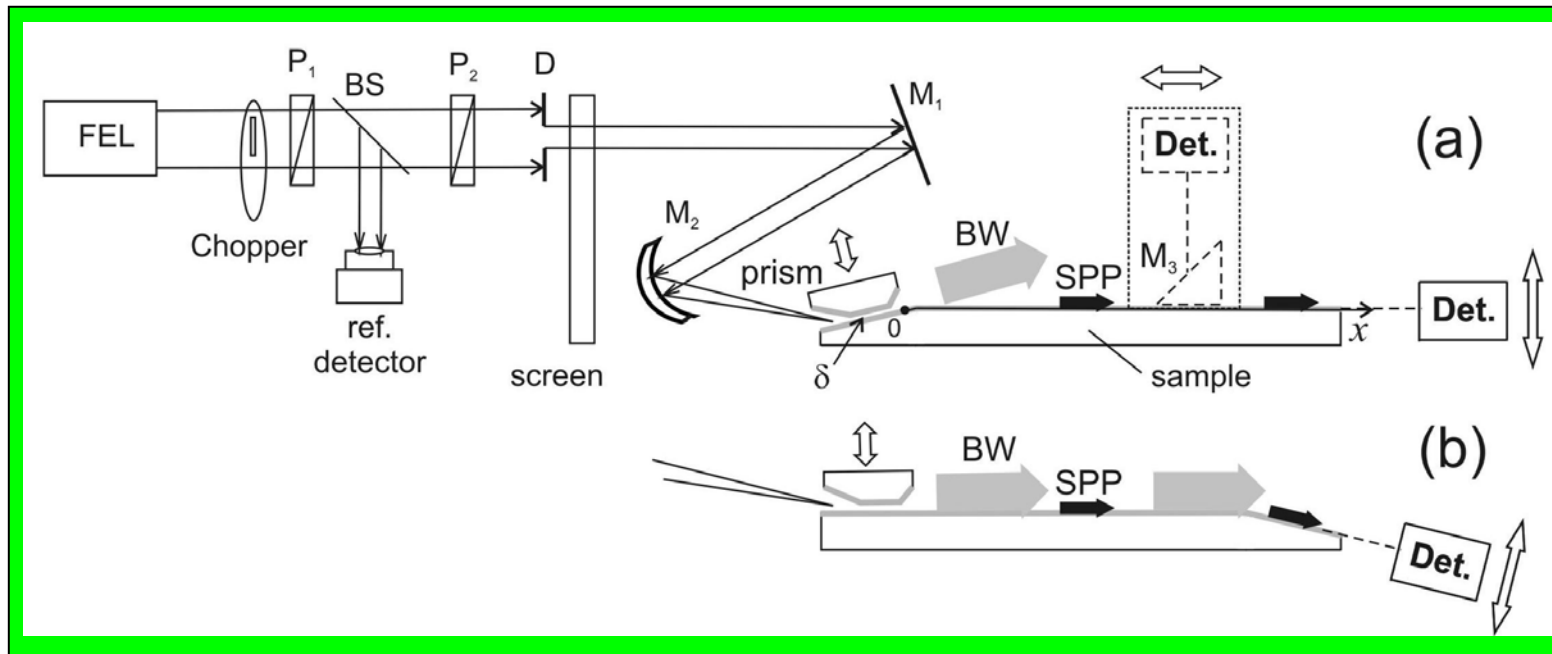
### 2. Опто-акустический приемник

### 3. Криогенный NbN болометр на «горячих электронах»

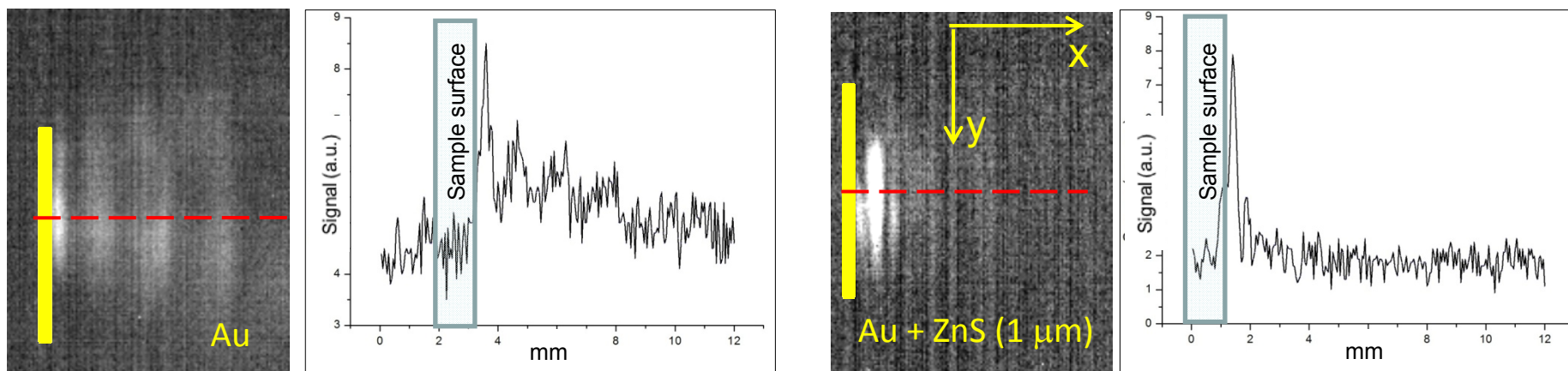
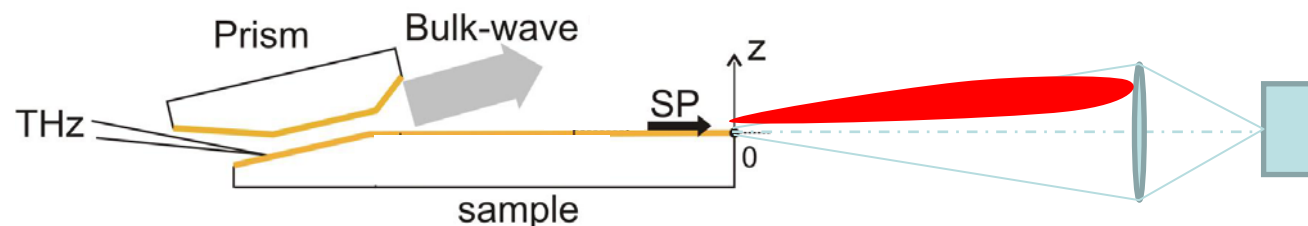
$$NEP \sim 10^{-11} \text{ W/Hz}^{1/2}$$



# Детализация экспериментальных конфигураций



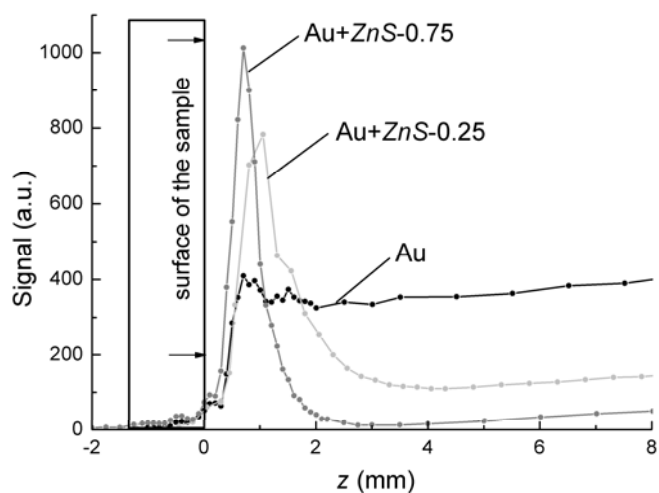
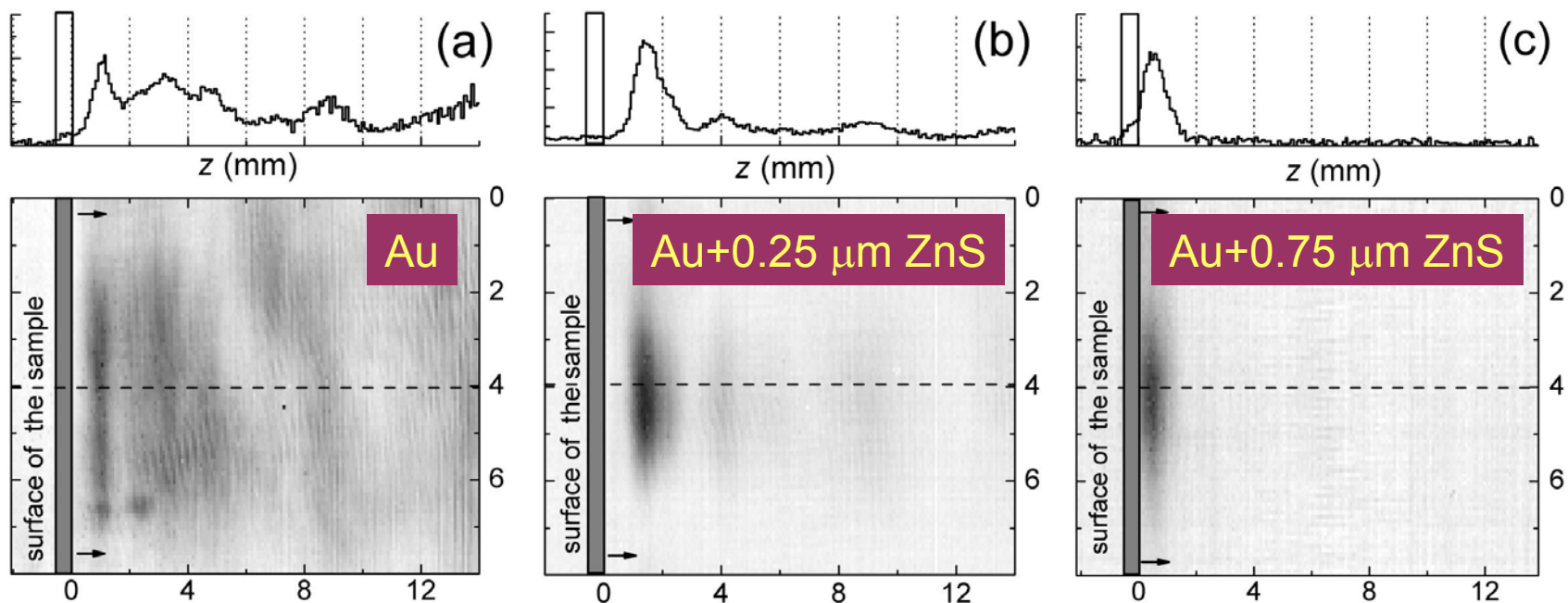
# Изображения интенсивности электромагнитной волны, образующейся при «срыве» ППП с торца образца



## Экспериментальные факты:

- Нанесение тонких слоев диэлектрика на металлическую поверхность (0.1 – 1 μm ZnS на Au) радикально изменяет характеристики ППП
- ЭМ-поле, образующееся при «срыве» плазмона имеет очень узкое угловое распределение
- Максимум интенсивности этого поля лежит несколько выше поверхности проводника
- В распределении интенсивности наблюдаются регулярные пики

# Дифракция поверхностного плазмона на торце проводящего клина (эксперимент)

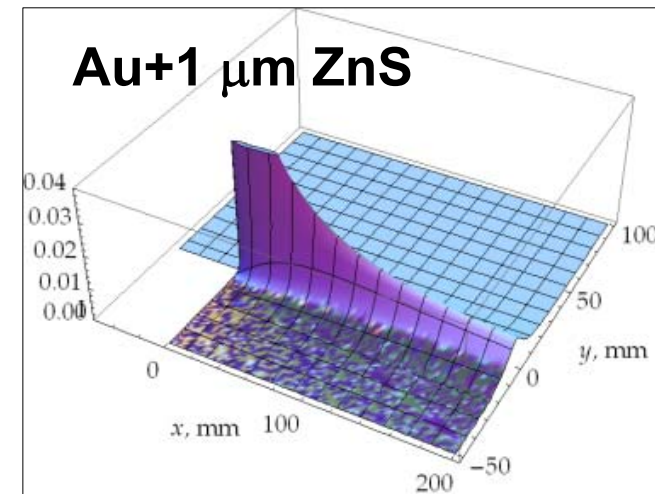
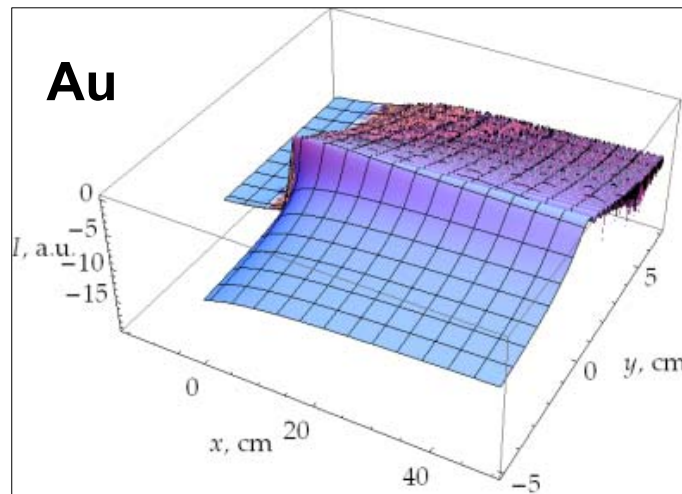


Снимки матричным  
микроболометрическим приемником  
и  
измерения опто-акустическим  
детектором

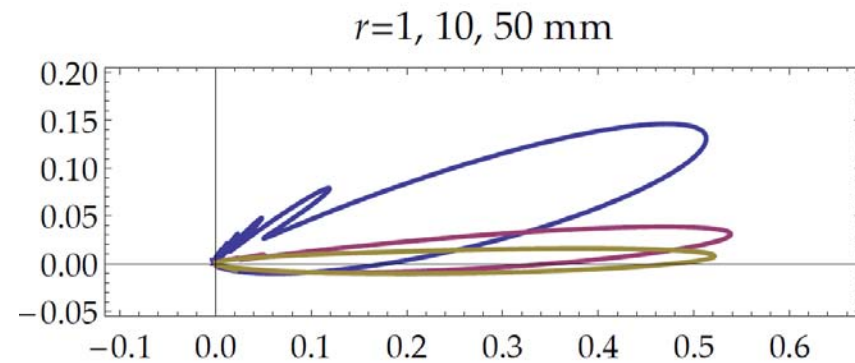
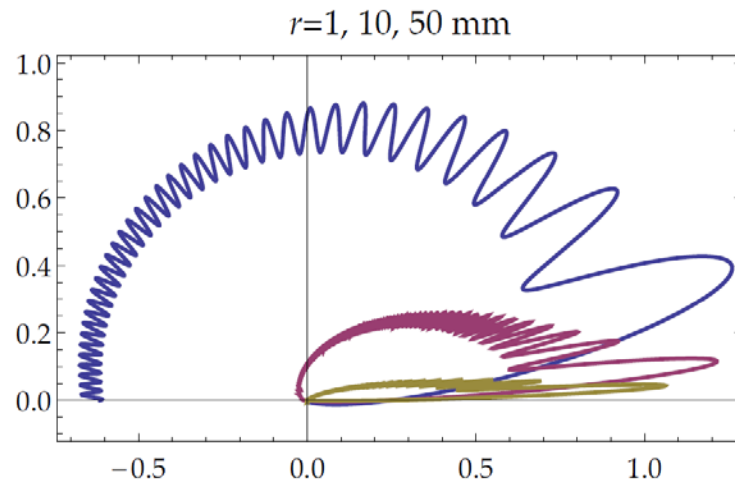
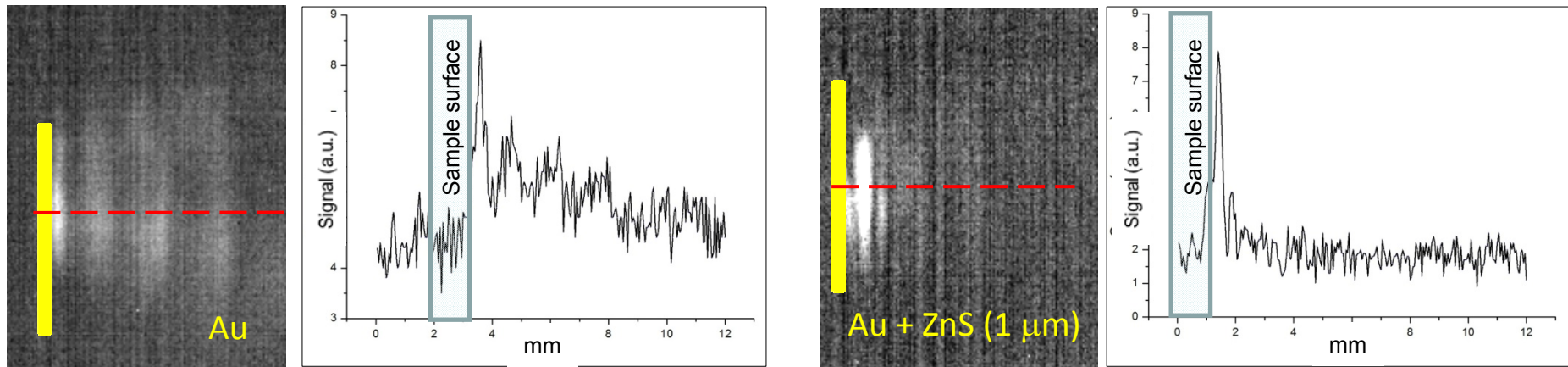
# Дифракция поверхностного плазмона на торце проводящего клина (теория)

Теоретические результаты, полученные методом Зоммерфельда-Малюжинца:

- ❑ Отражения ППП от торца отсутствует
- ❑ В волновой зоне рассеянная волна имеет лоренцовское распределение с шириной, определяемой поверхностным импедансом, причем, для клина с малым импедансом волновая зона начинается на очень больших расстояниях
- ❑ Теоретические распределения хорошо совпадают с экспериментальными
- ❑ Нанесение тонкого слоя ZnS (0.1 – 1 нм) на золотую поверхность радикально меняет характеристики ППП
- ❑ Распределение ЭМ-поля в направлении перпендикулярном поверхности имеет регулярные пики

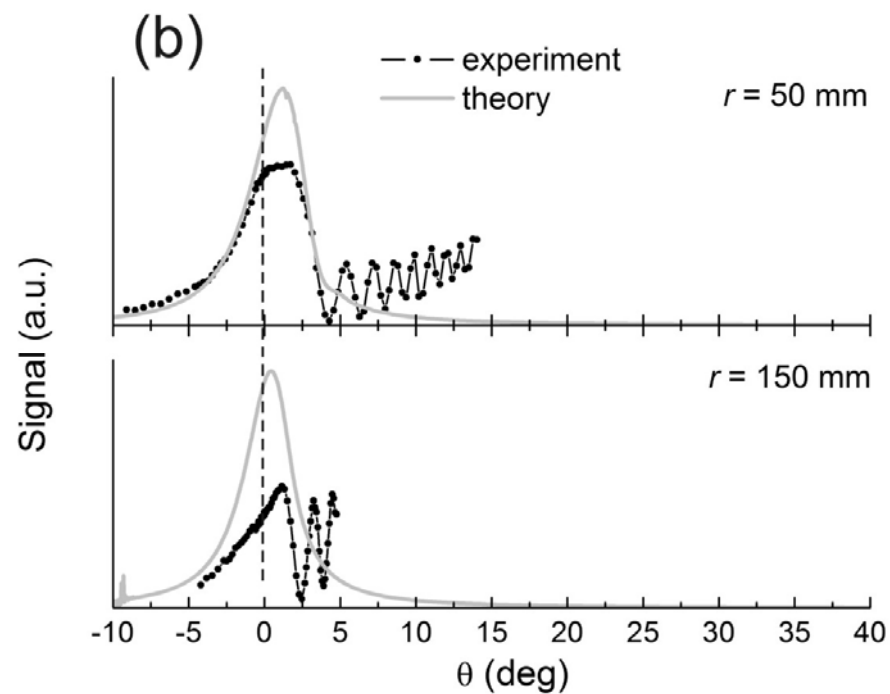
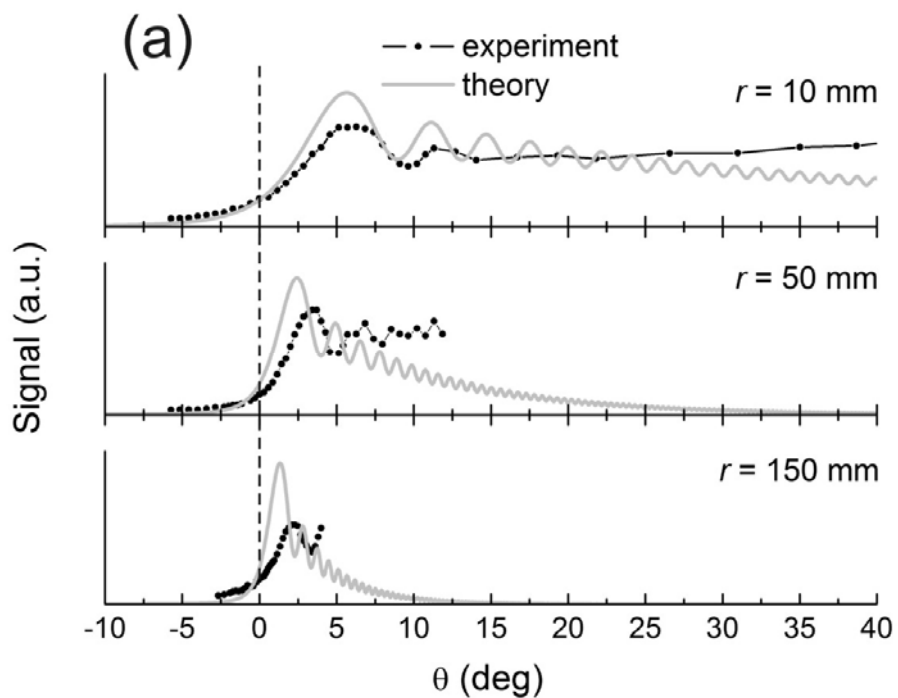


## Сравнение теории и эксперимента

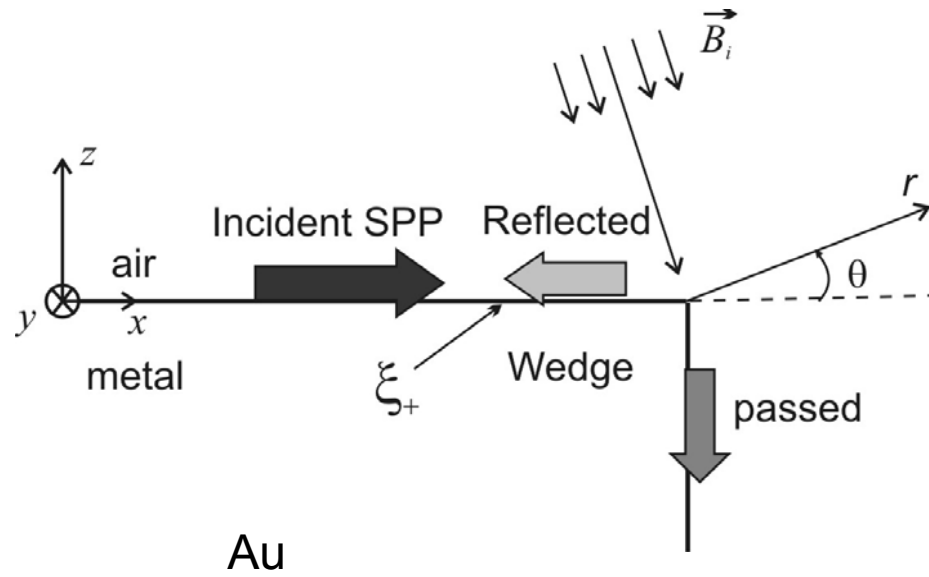


Угловое распределение интенсивности дифрагированной волны

# Распределение интенсивности в ЭМ-волне, сорвавшейся с торца для золота и золота (a), покрытого ZnS (b)



# Характеристики поверхностных плазмонов для золота и золота, покрытого ZnS



$$\xi = \sin \chi = \sqrt{\frac{1}{1 + \varepsilon}}$$

$$\begin{aligned} \chi &= 0.001022 - i \cdot 0.001417, \\ k_s &= (44880 + i \cdot 0.065) \text{ m}^{-1}, \\ \varkappa &= (64 + i \cdot 46) \text{ m}^{-1}. \end{aligned}$$

$$L'_p = 15 \text{ \AA},$$

$$d'_p = 16 \text{ \AA},$$

$$\xi' \approx 0.00102 - i \cdot 0.00142$$

Au + 0.75  $\mu\text{m}$  ZnS

$$\begin{aligned} \chi' &= 0.001048 - i \cdot 0.031, \\ k'_s &= (44900 + i \cdot 0.00147) \text{ m}^{-1}, \\ \varkappa' &= (1400 + i \cdot 47) \text{ m}^{-1}. \end{aligned}$$

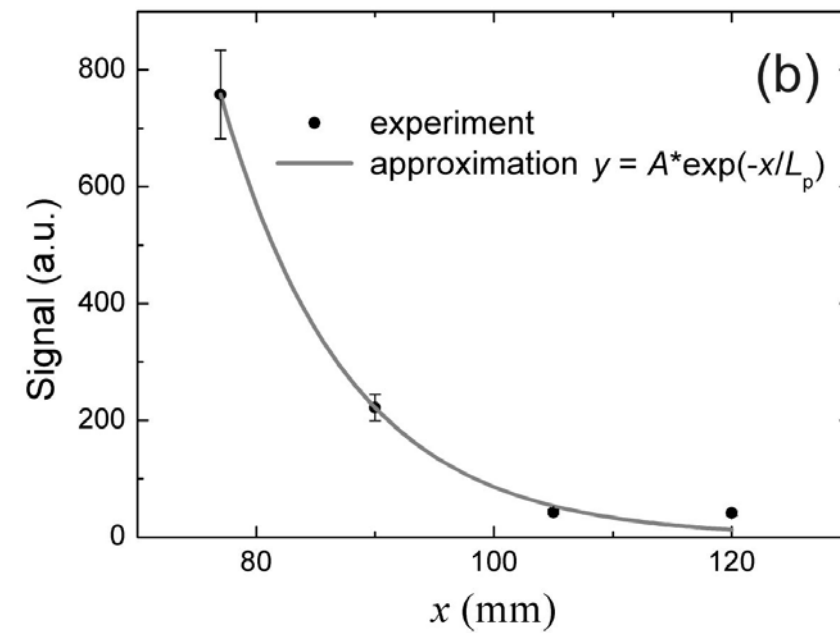
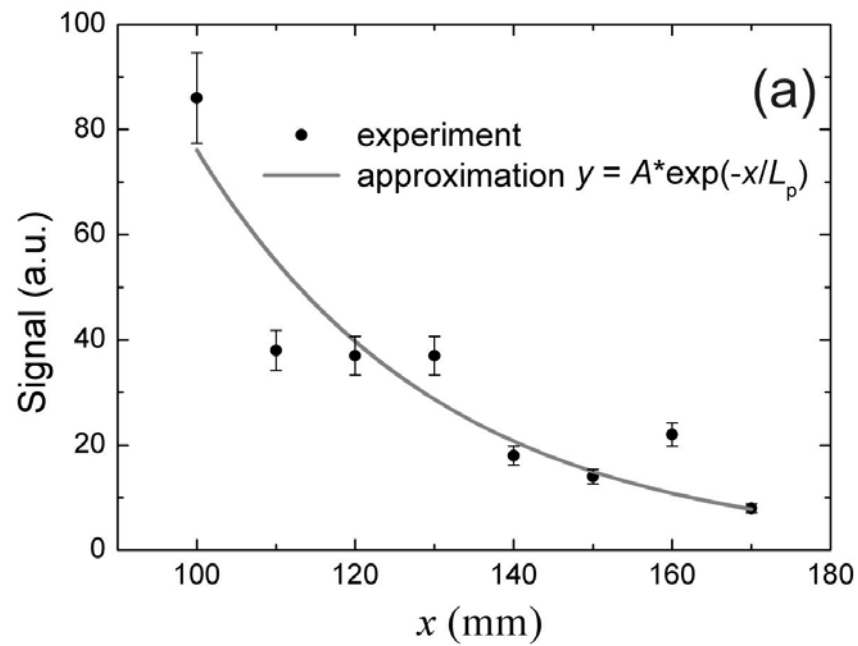
$$L'_p = 0.7 \text{ nm},$$

$$d'_p = 0.7 \text{ nm},$$

$$\xi' \approx 0.00109 - i \cdot 0.0336.$$

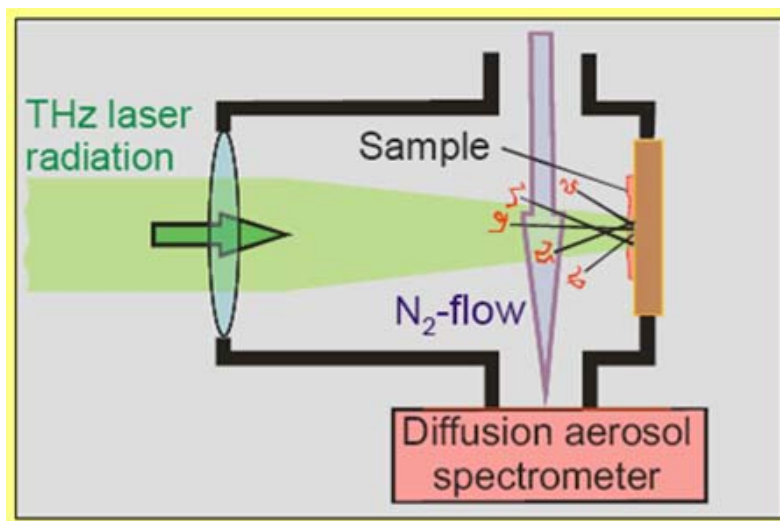


# Длина пробега поверхностного плазмона для золота (a) и золота, покрытого ZnS (b)

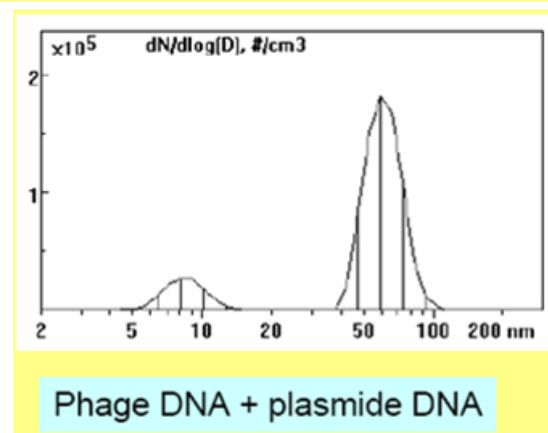
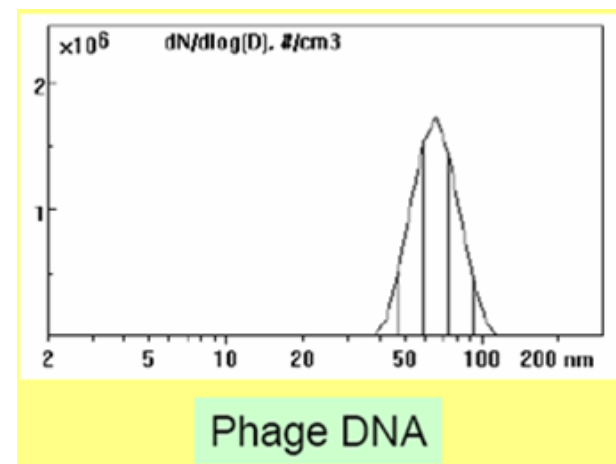


# Разные эксперименты на ИЛСЭ

# Ультрамягкая лазерная абляция ДНК (ИХКГ, ИЦГ, ИЯФ)

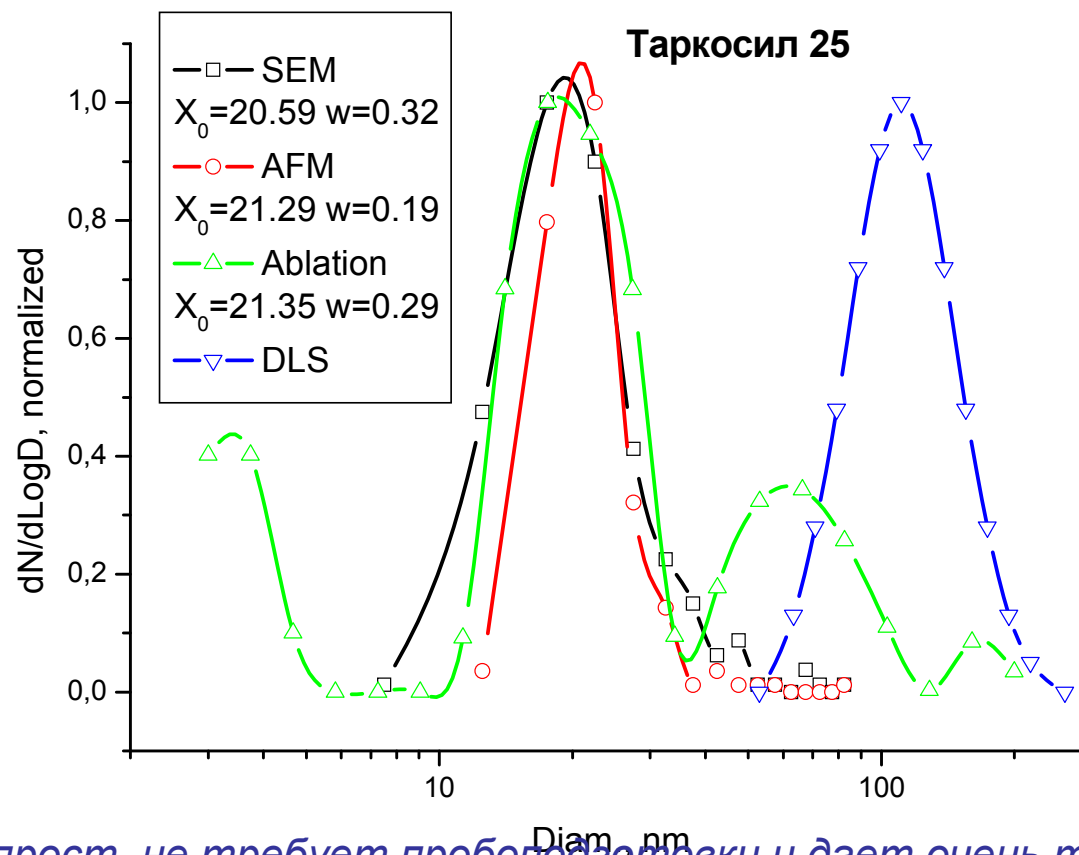


Demonstration of ultra-soft ablation of DNA samples without defragmentation: when the power density of THz radiation is optimal, particle size spectra contain only the peaks corresponding to the initial particles.



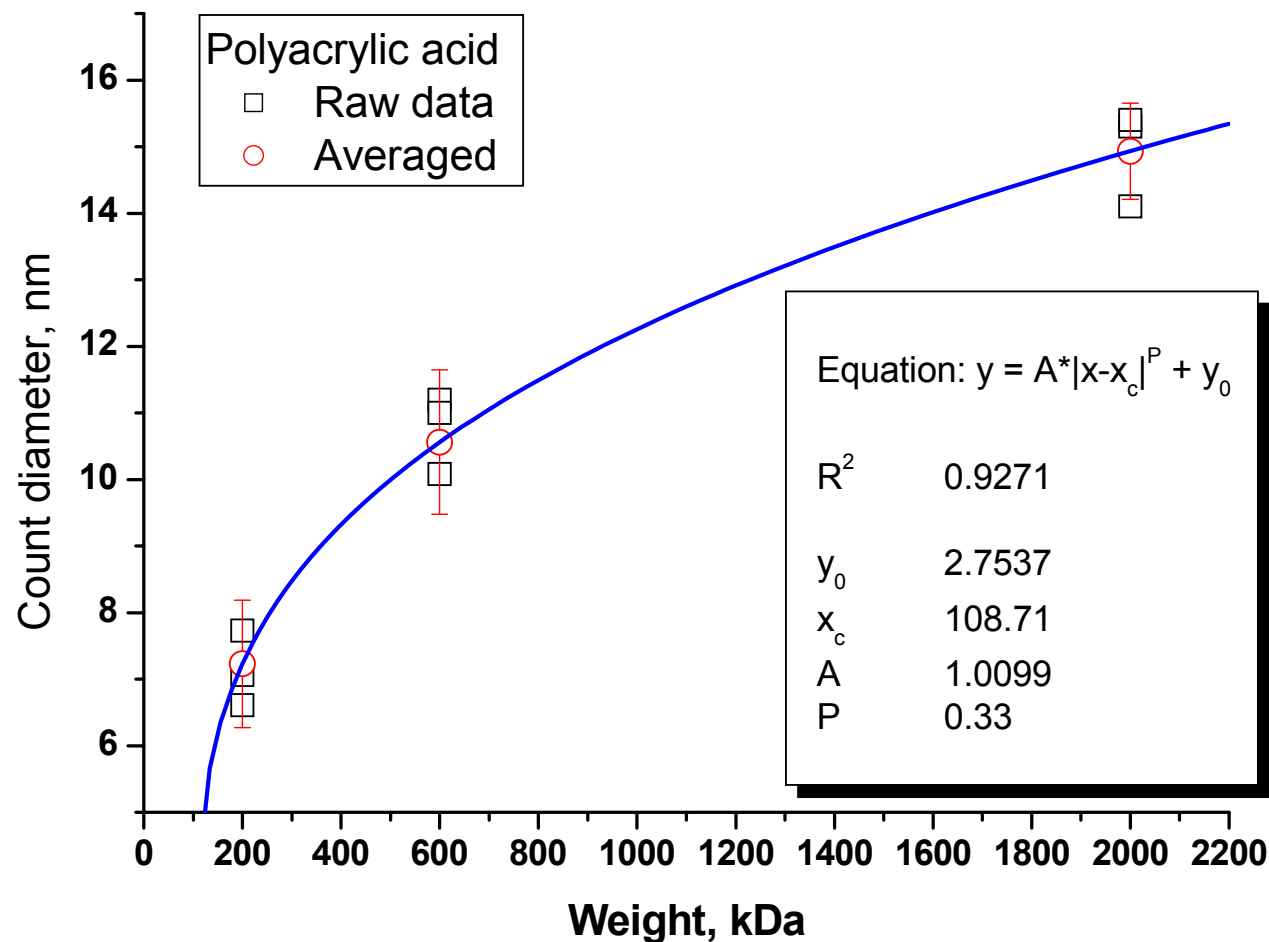
Явление мягкой абляции терагерцовым излучением было открыто на новосибирском ЛСЭ. Под действием этого излучения молекулы, нанобъекты и аэрозоли переносятся без разрушения с поверхности в окружающий газ без изменения структуры. Это явление открывает широкие возможности для био- и нанотехнологий.

# ТГц-ЛСЭ абляция: измерение размеров смеси искусственных наночастиц



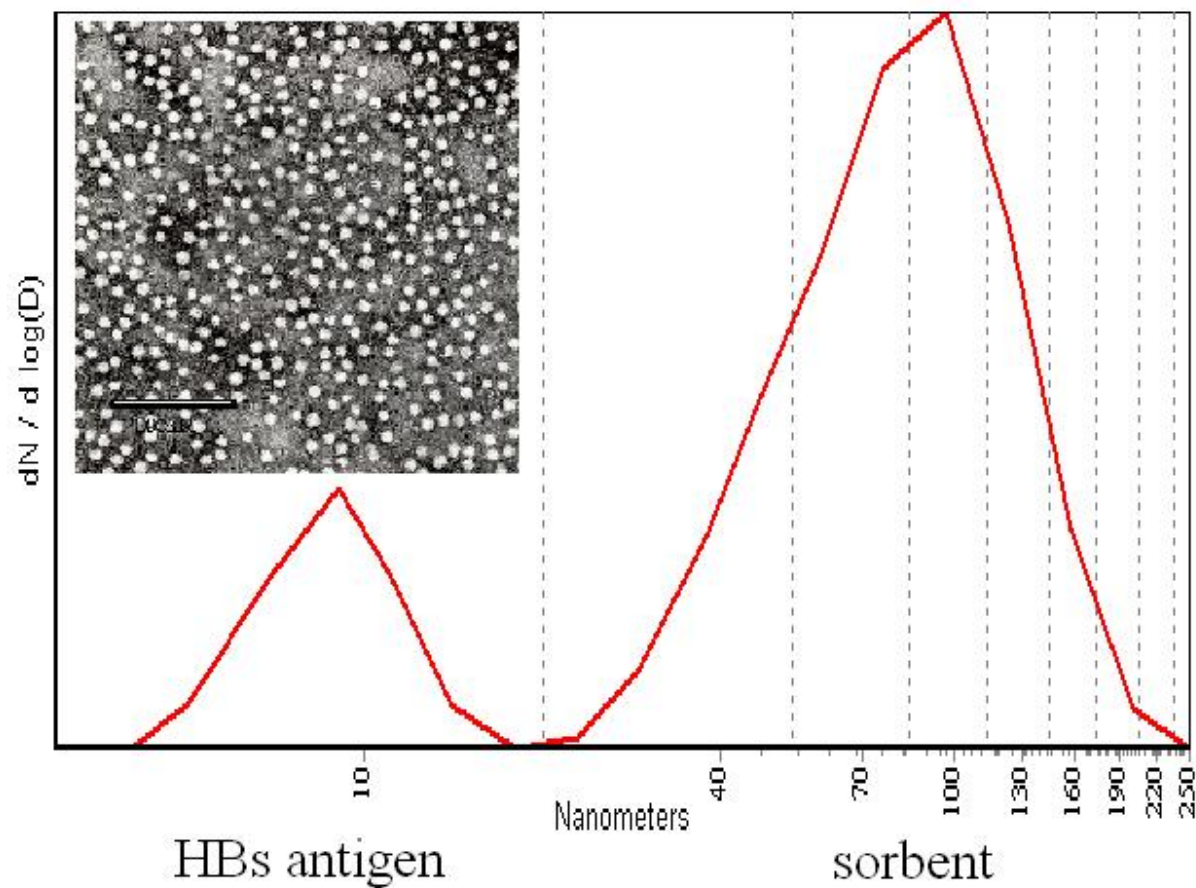
*Метод очень прост, не требует пробоподготовки и дает очень точные результаты.*

## ТГц-ЛСЭ абляция: Измерение молекулярного веса синтетических полимеров



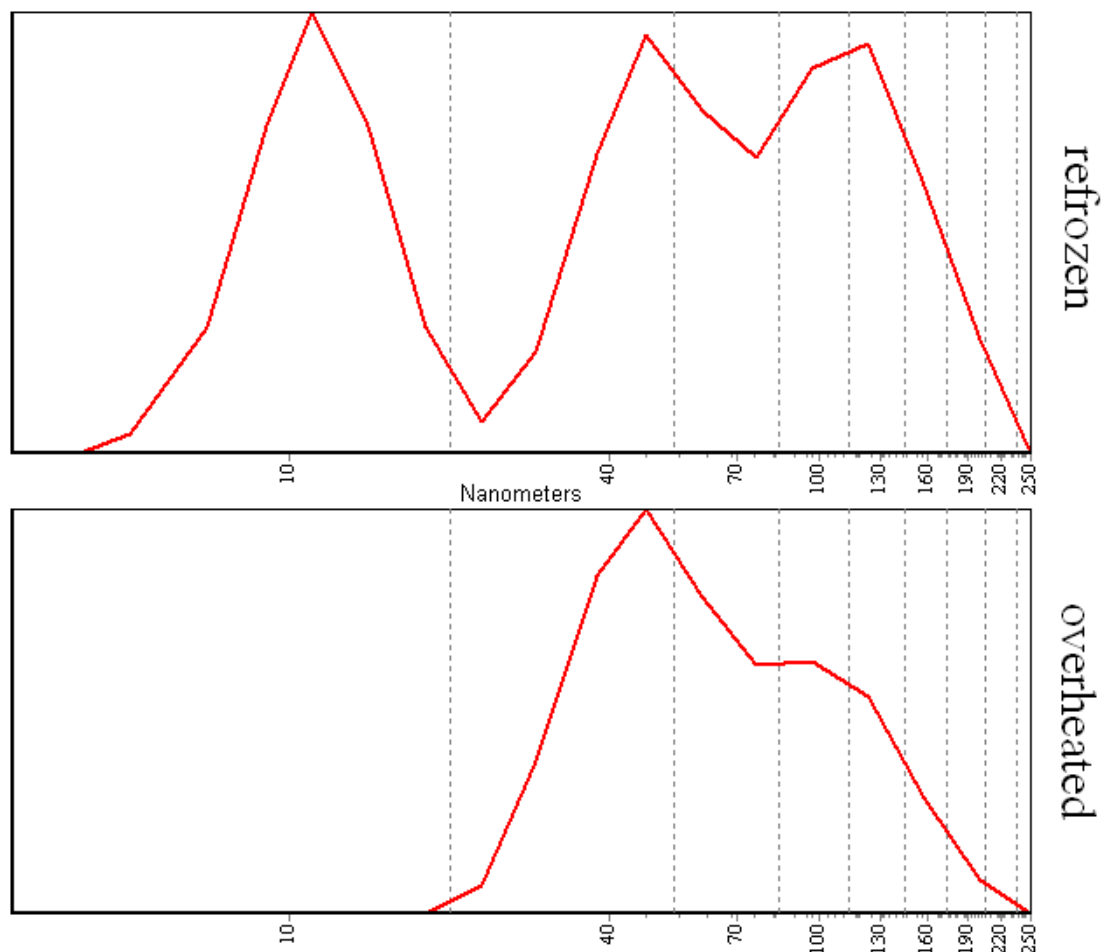
*Успешное применение метода для исследования синтетических полимеров*

# ТГц-ЛСЭ абляция: Фракционный состав вакцины гепатита В - 1



*Возможность простой проверки годности вакцины к употреблению – абляция и сбор аэрозолей показывает, что вакцина пригодна к употреблению*

## ТГц-ЛСЭ абляция: Фракционный состав вакцины гепатита В - 2



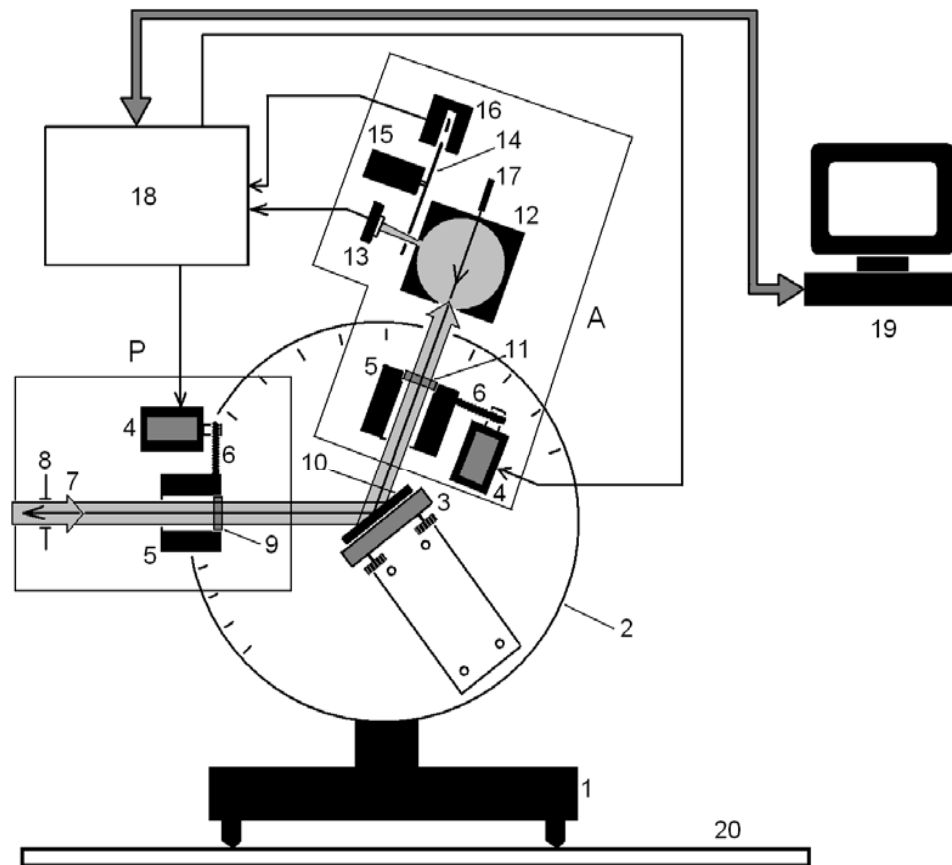
*В данном случае абляция и сбор аэрозолей показывают, что вакцина непригодна к употреблению*

## Изучено воздействие терагерцового излучения на биологические объекты (ИЦГ)

1. На генетические материалы (PUC18 plasmid DNA)
2. На стресс-чувствительные клеточные системы
3. На экспрессию генов *colidps kat G and E*.
4. Изучен интегральный протеомный отклик клкток *E. coli* на облучение терагерцовым излучением



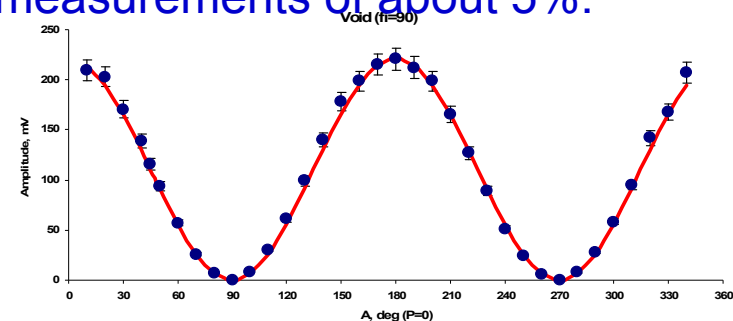
# Эллипсометрия в ТГц диапазоне (ИФП, ИЯФ)



Ellipsometry measures the complex reflectance ratio,  $\rho$ , of a system, which may be parametrized by the amplitude component  $\Psi$  and the phase difference  $\Delta$ .

$$\rho = \frac{r_p}{r_s} \quad \rho = \tan(\Psi)e^{i\Delta}$$

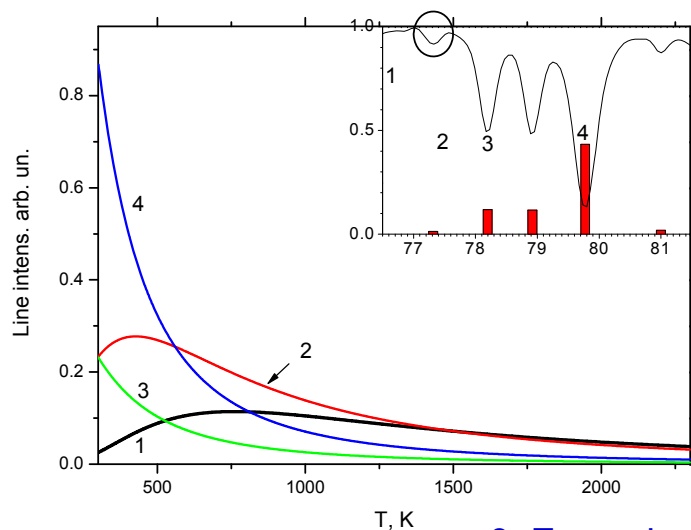
First experiments identified an accuracy of photometric measurements of about 5%.



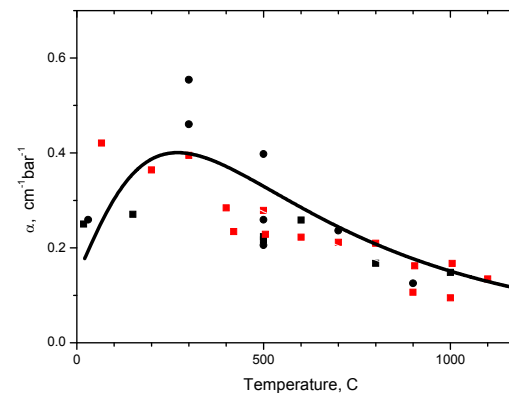
1-support, 2-goniometric circle with 5-degree discretisation of the incidence angle, 3-objective stage, 4-stepper motors, 5-polarizer arbor, 6-worm-gear, 7-FEL beam, 8-entrance aperture, 9-polarizer, 10-measured sample, 11-analyzer, 12-spherical depolarizer, 13-pyroelectric detector, 14-chopper, 15-gearmotor, 16-optocoupler, 17-red set-up laser, 18-electrical controller, 19-computer, 20-base plate.

# Измерение концентрации паров воды в пламенах

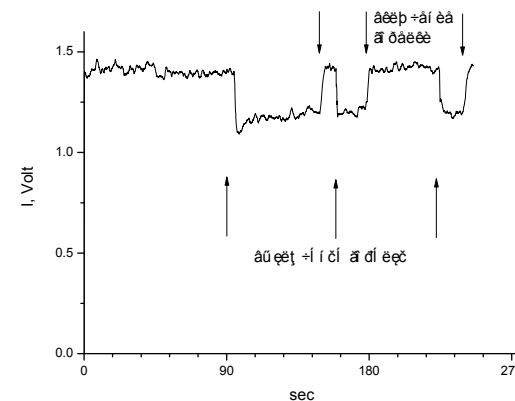
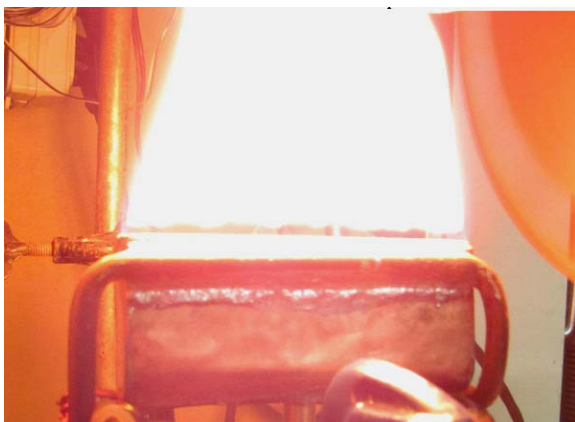
1. Choosing of the absorption line.  
Line # 1 is the best at high temperatures.



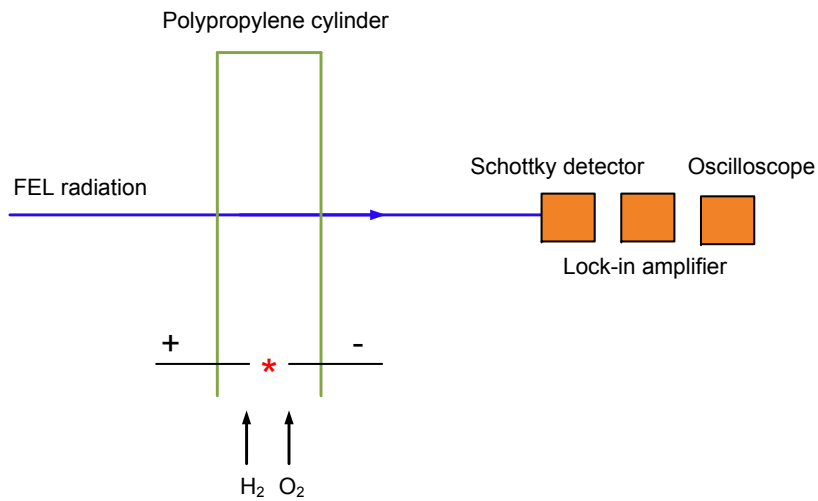
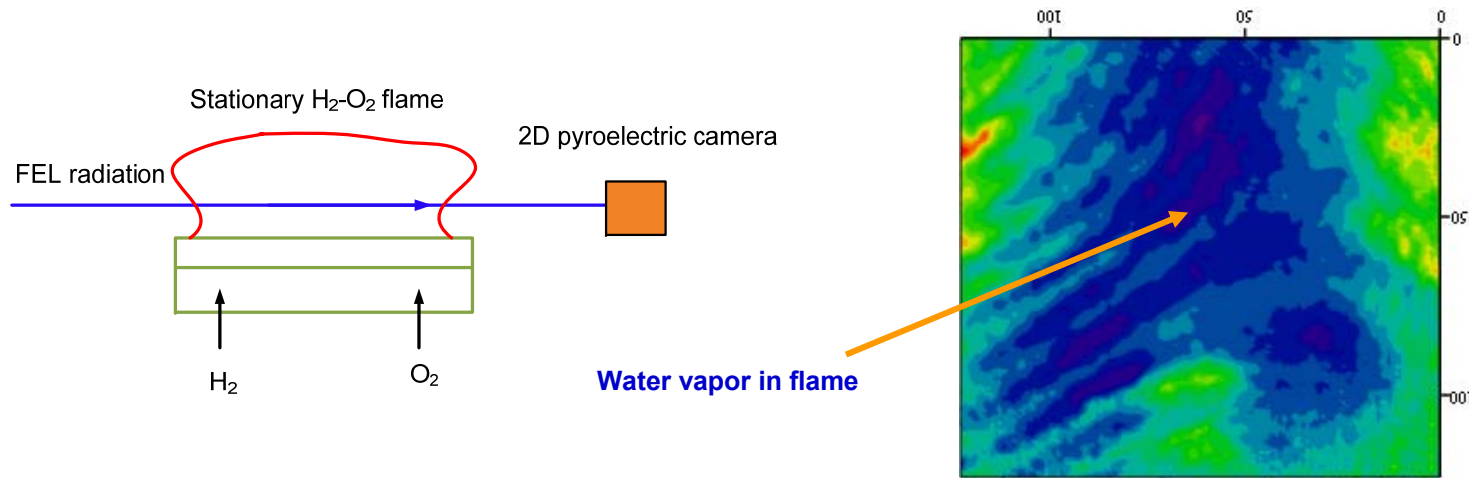
2. Calibration of absorption at different temperatures. Line #1



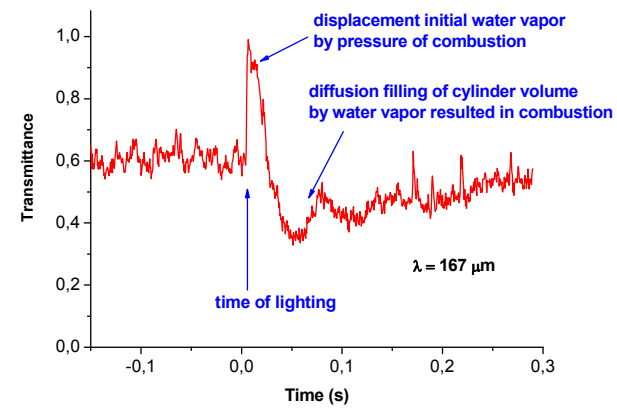
3. Example of the measurements in the ethane / O<sub>2</sub> flame.



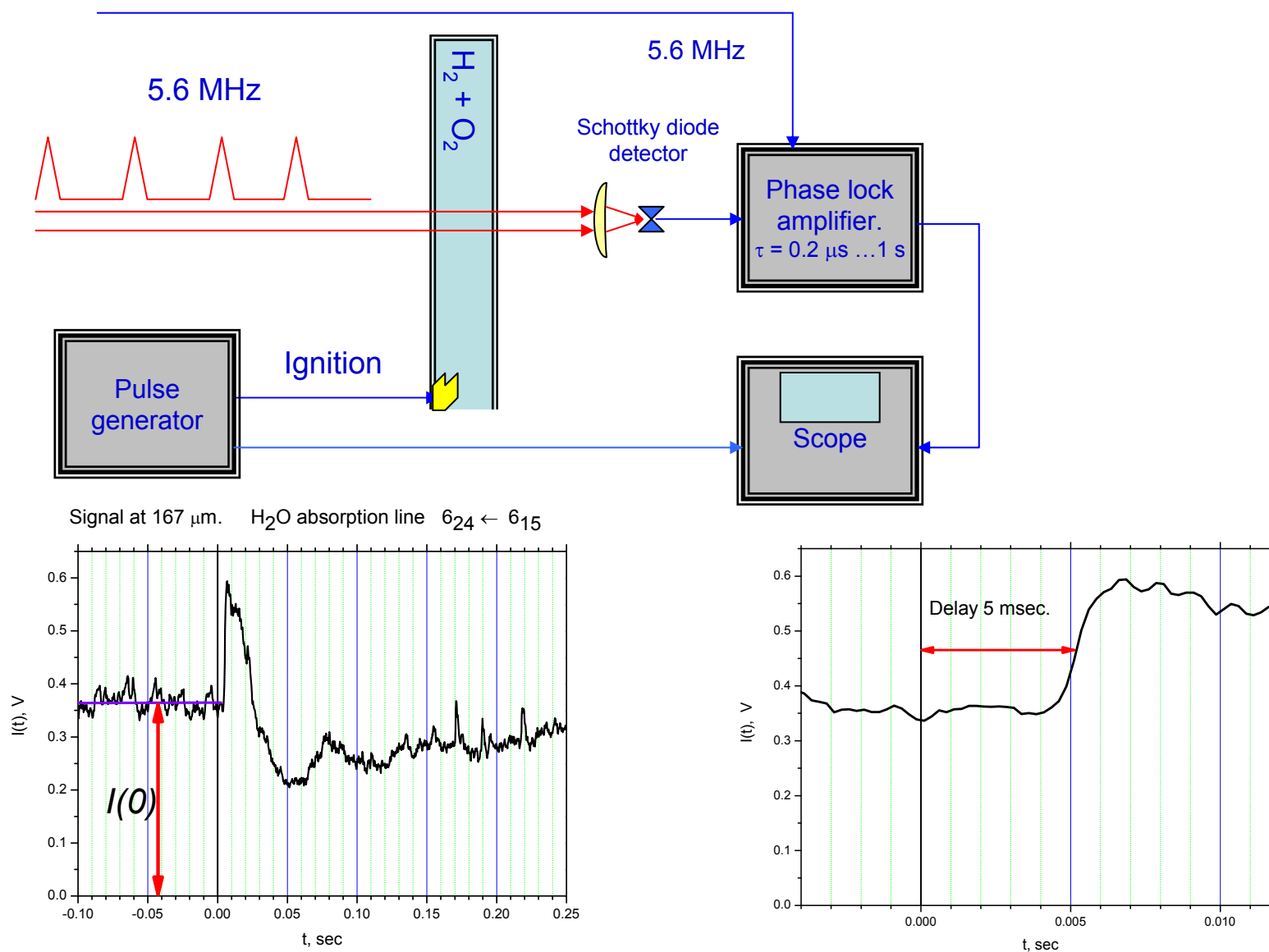
# Исследование $H_2 - O_2$ горения на НЛСЭ: поглощение ТГц излучения в парах воды



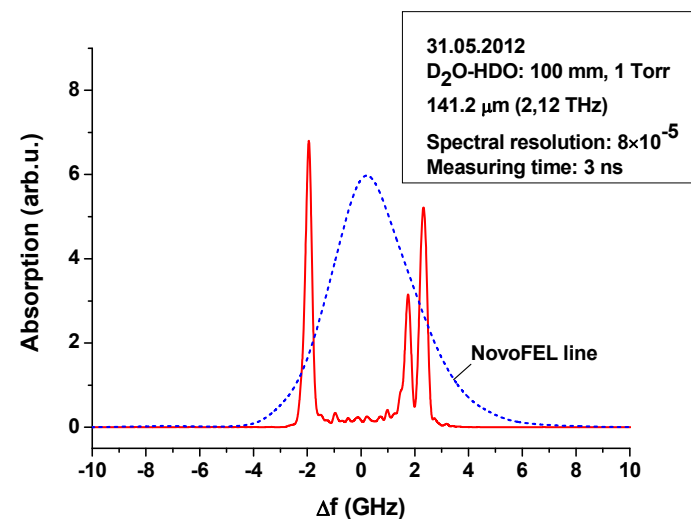
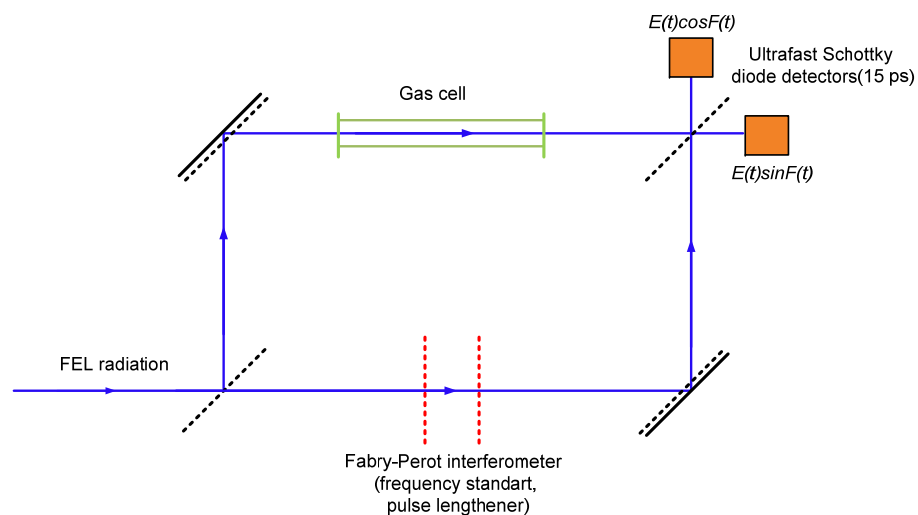
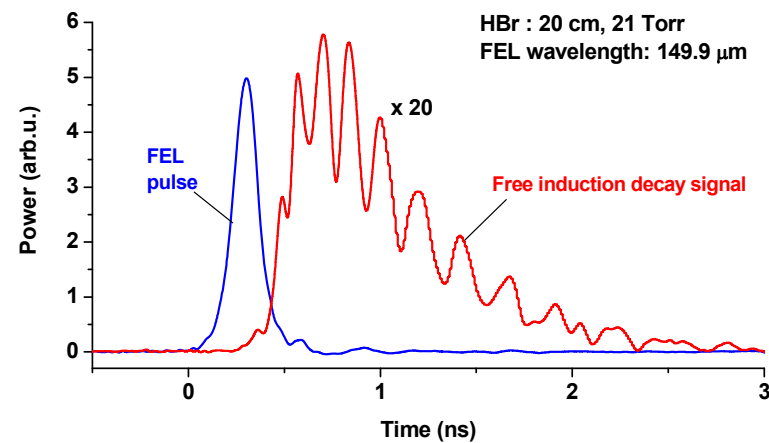
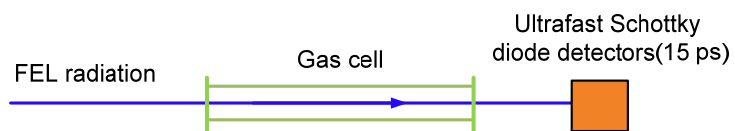
Combustion  $H_2 - O_2$  mixer in  $\varnothing 40 \times 200$  mm polypropylene cylinder



# Исследование взрыва и детонации смесей



# Сверхбыстрая спектроскопия во временном домене



**Applications: nonrepeatable phenomena, high-resolution spectroscopy, collisional cross-sections**

# Сверхпроводниковый болометр

на горячих электронах



# Сверхпроводниковые терагерцовые смесители, детекторы и счетчики фотонов на электронном разогреве в тонкой пленке NbN

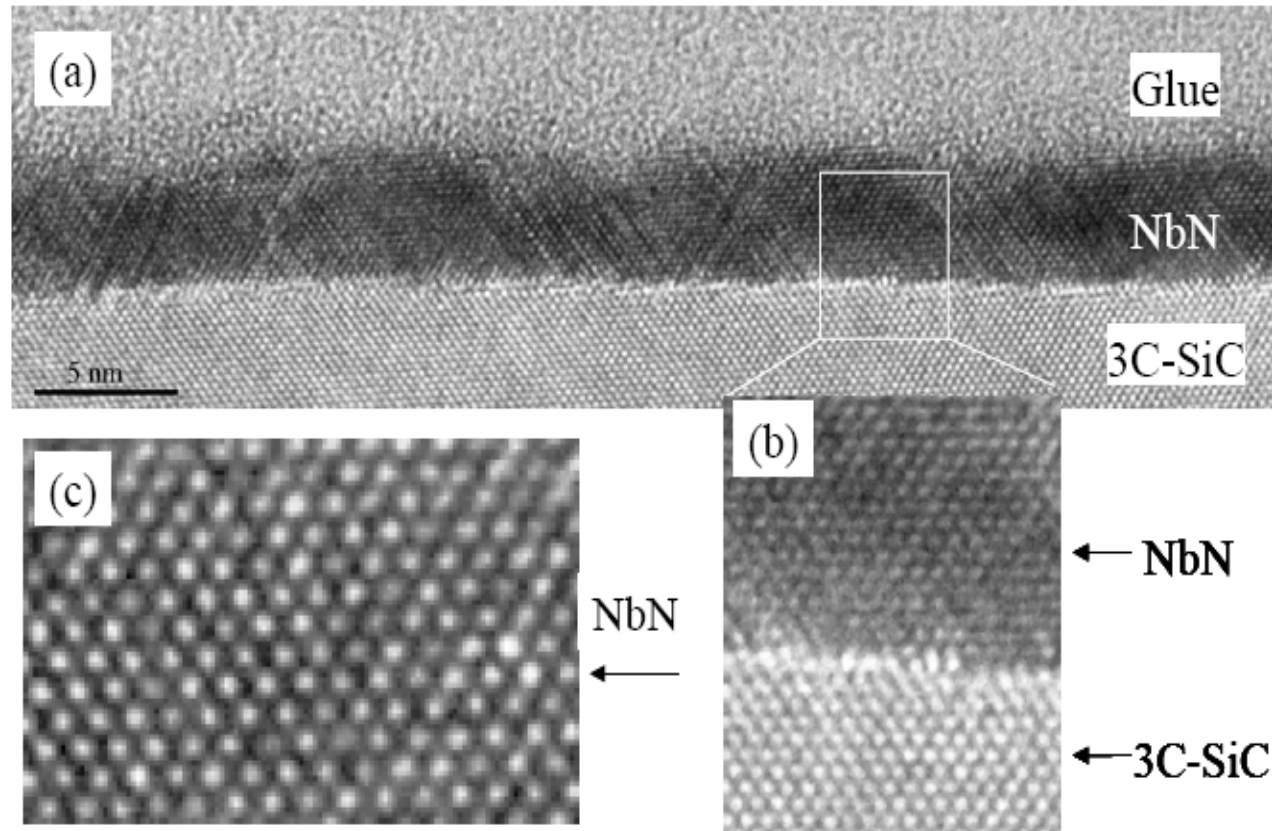
В данном разделе использован сокращенный вариант (частично переведенной нами на русский язык) презентации

Г.Н. Гольцман, А.А. Корнеев, А.В. Дивочий, И.Н. Флоря, Ю.П. Корнеева, М.А. Тархов, М.И.Финкель, С.А. Рябчун, И.В. Третьяков, Н.С. Каурова, Г.М. Чулкова, Б.М. Воронов

Московский Педагогический Государственный Университет, Москва, Россия

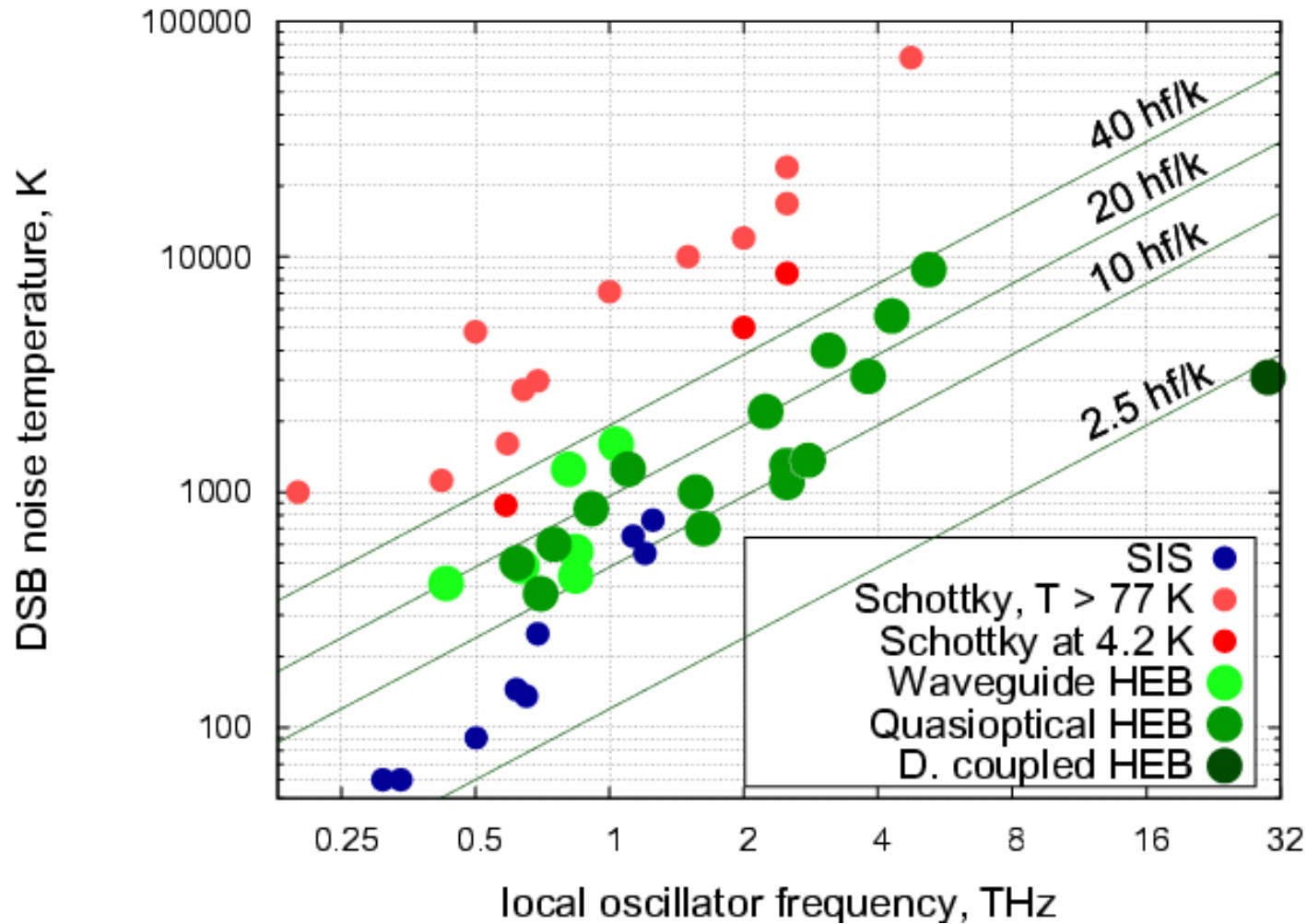
- Ультратонкая сверхпроводниковая пленка NbN – уникальный материал для малошумящих и быстрых ТГц и ИК детекторов
- Сверхпроводниковый болометр на горячих электронах (НЭВ) с фоновым и диффузионным каналами охлаждения и его применение в радиоастрономии
- НЭВ как прямой детектор

# Кристаллическая структура ультратонкой пленки NbN и ее уникальные сверхпроводниковые свойства

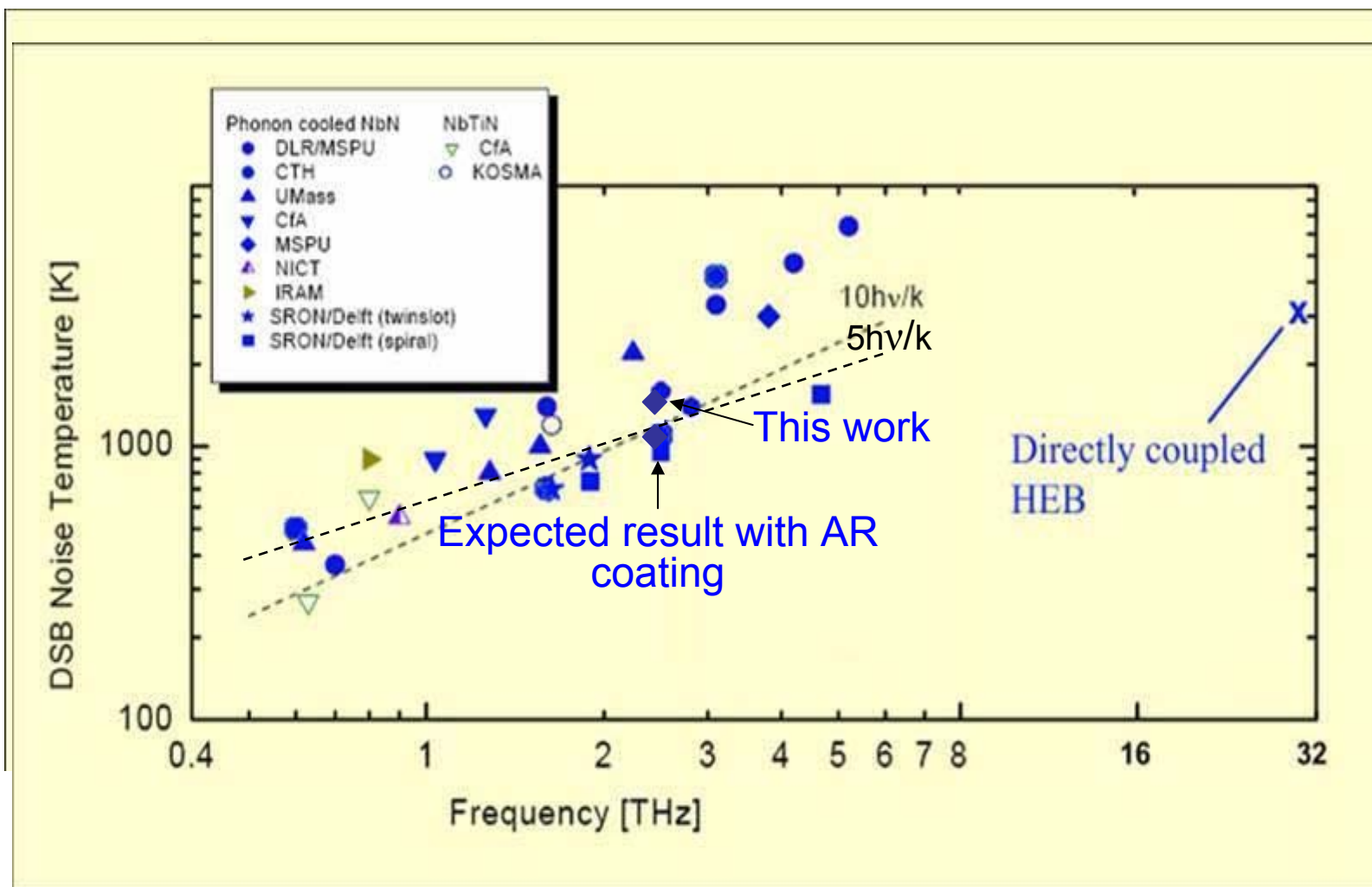




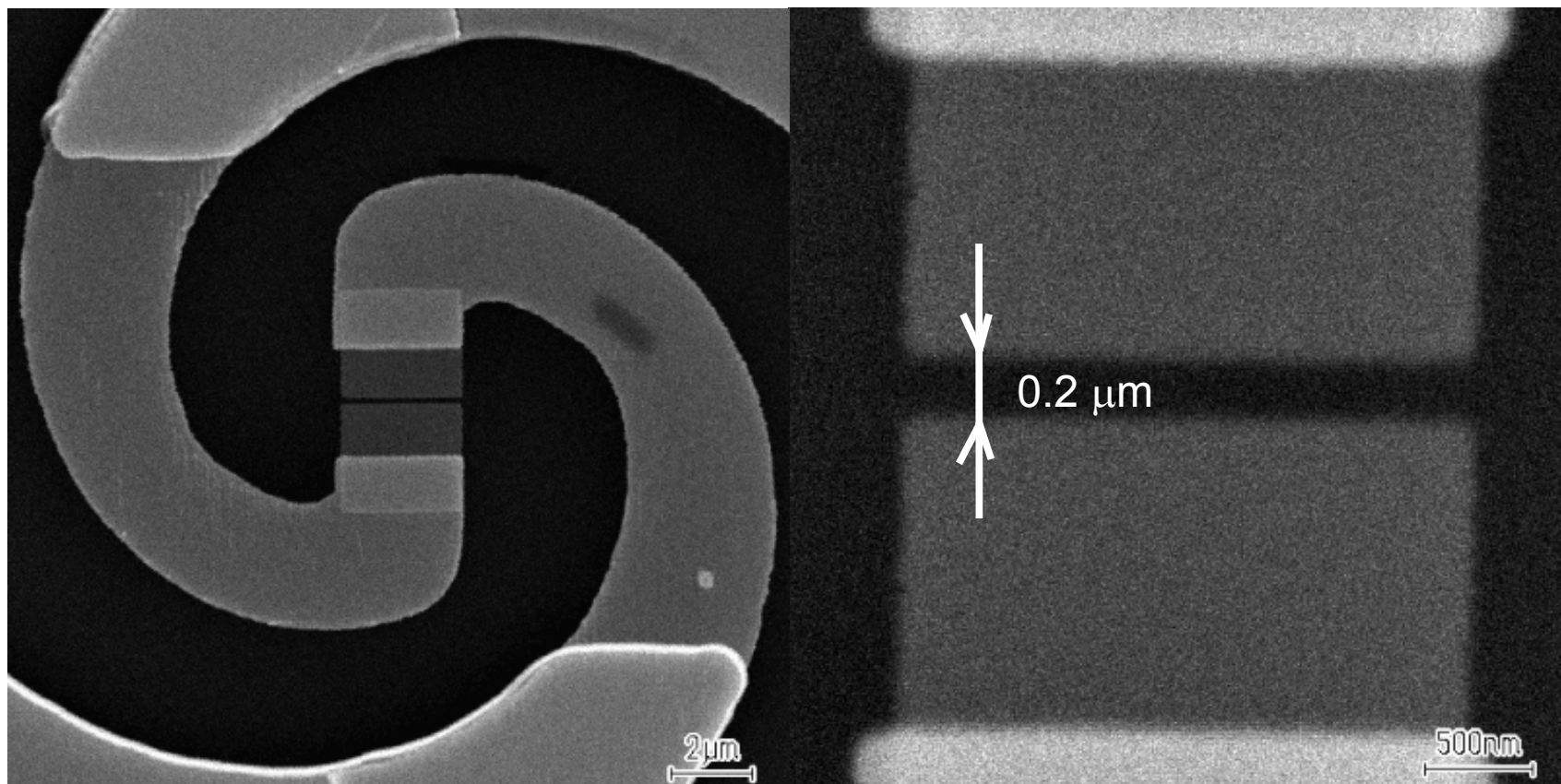
# Шумовая температура гетеродинных терагерцовых приемников



# Шумовая температура гетеродинных терагерцовых приемников со сверхпроводниковыми НЕВ смесителями



# SEM микрофотография центральной области НЭВ смесителя

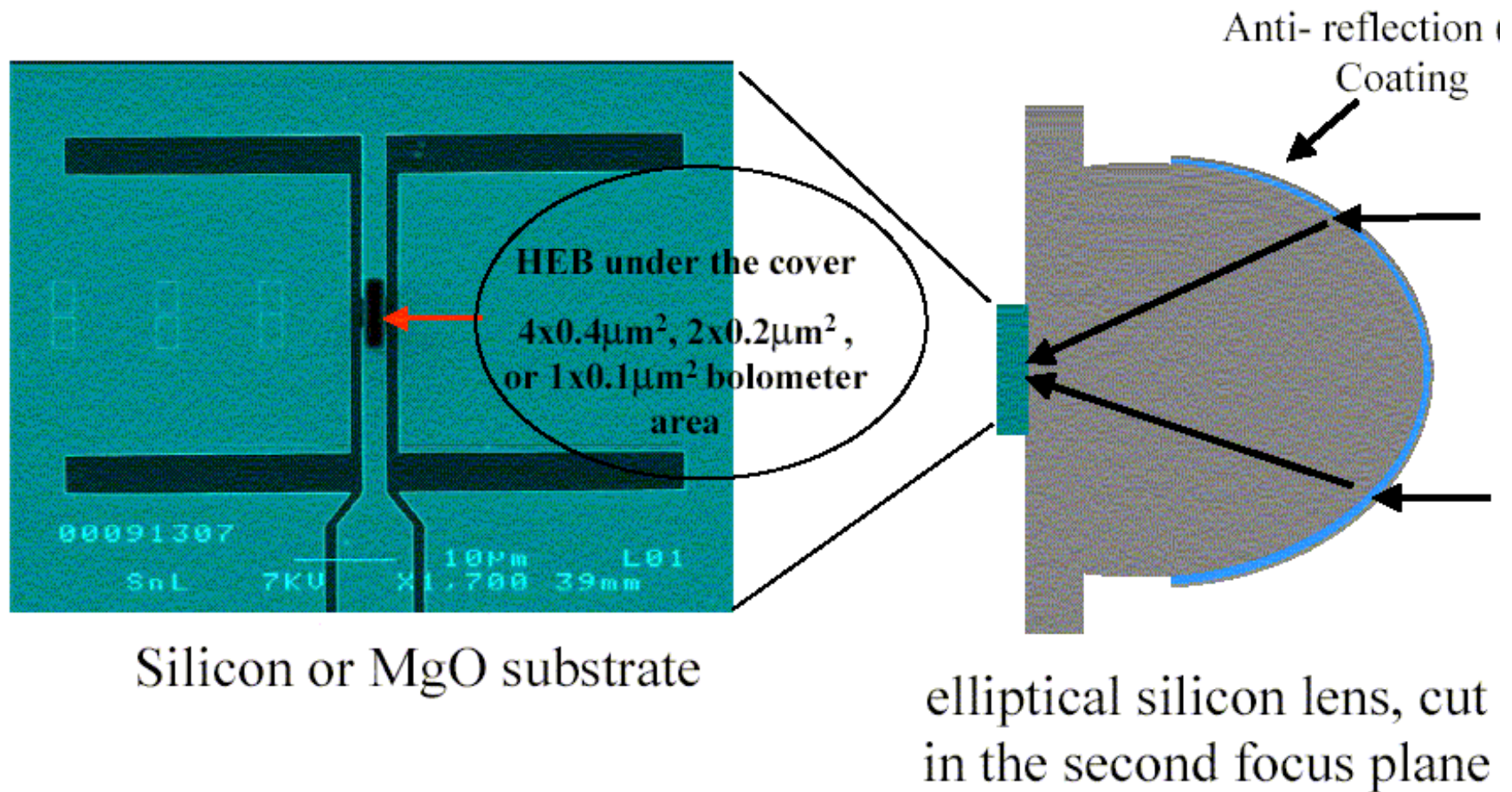




# Twin-Slot с HEB смесителем



Twin-Slot Antenna is designed for 0.6 THz, 1.6THz and 2.5THz center frequency.

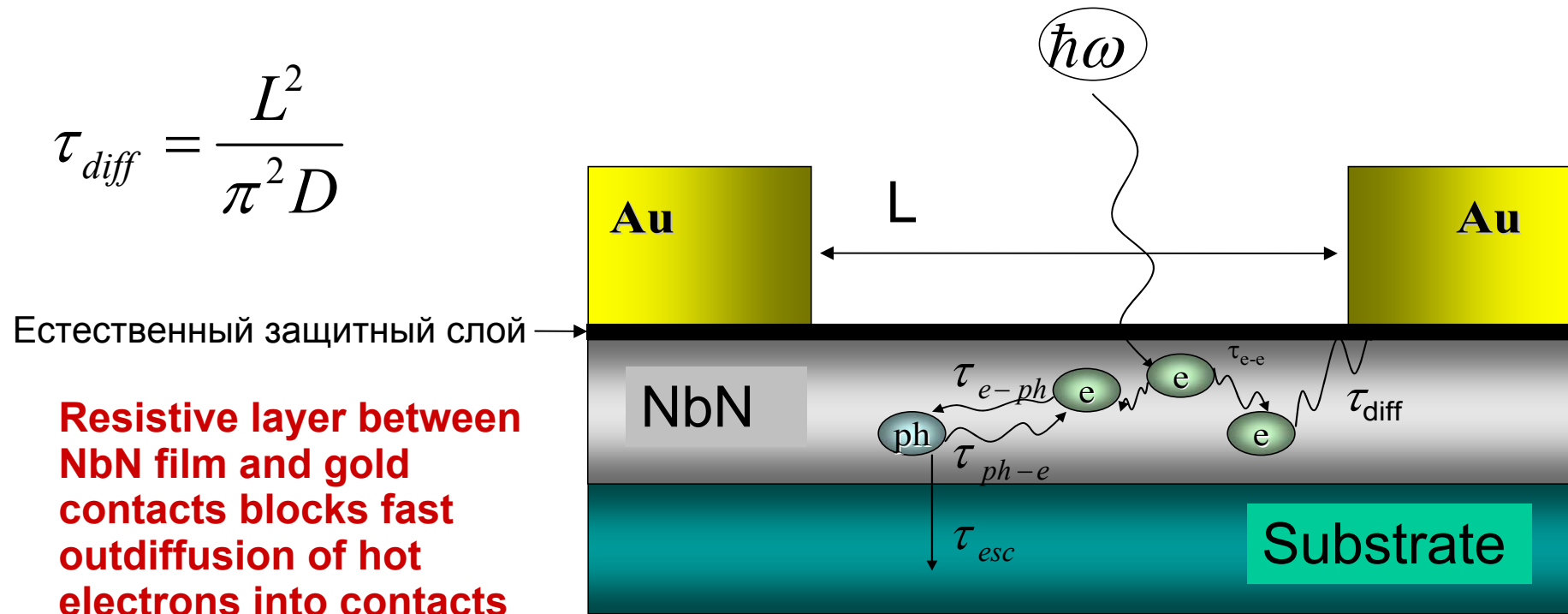


Silicon or MgO substrate

elliptical silicon lens, cut in the second focus plane

# Дополнительное диффузионное охлаждение горячих электронов в NbN HEВ смесителе

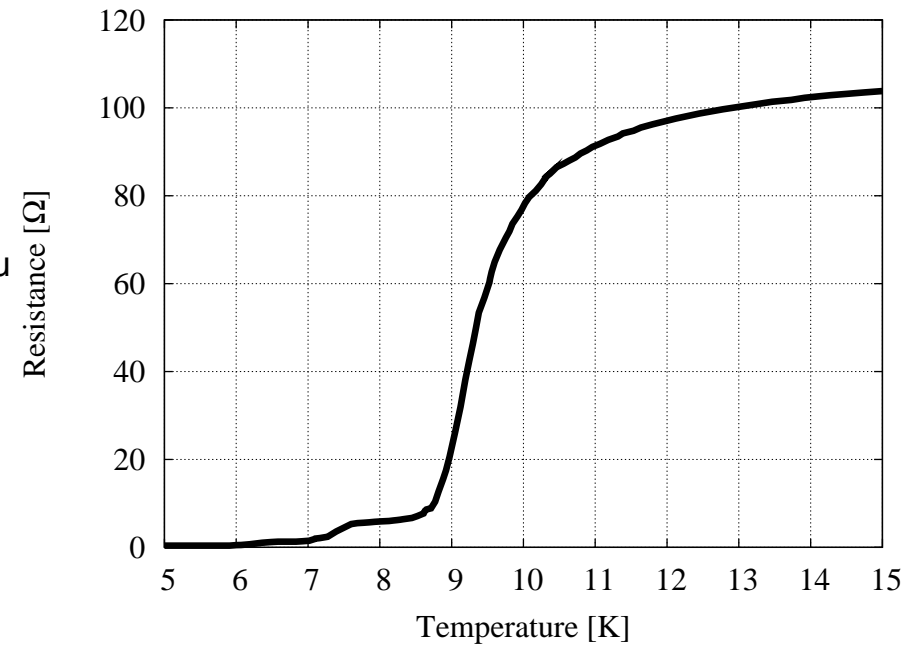
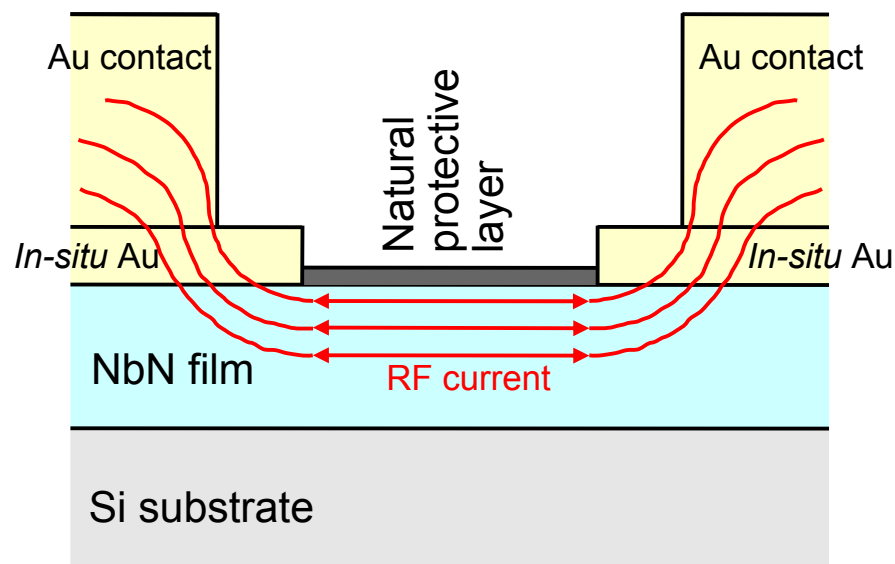
$$\tau_{diff} = \frac{L^2}{\pi^2 D}$$



NbN HEB mixers based on the traditional contacts fabrication technology do not show any substantial dependence of the gain bandwidth on the bridge length

Good contacts are required to open additional diffusion cooling

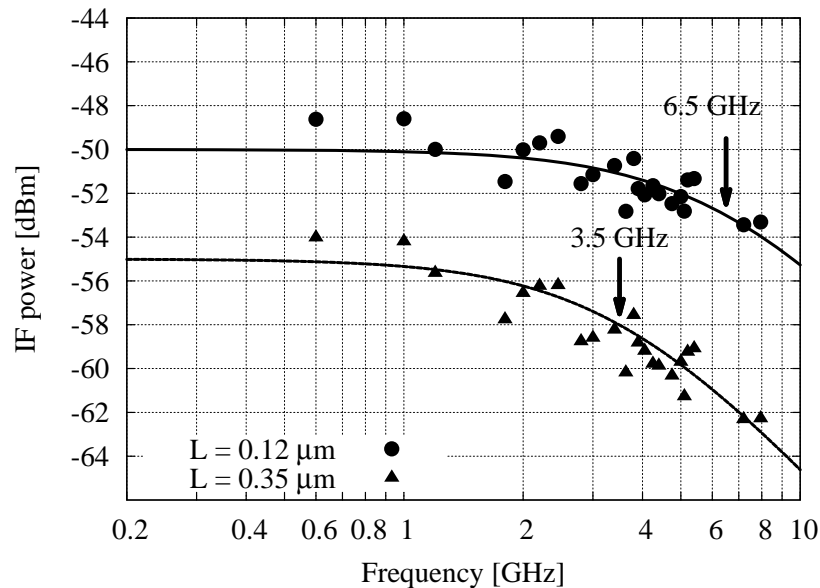
# Новый NbN HEB миксер, изготовленный в МГТУ: *in-situ* процесс



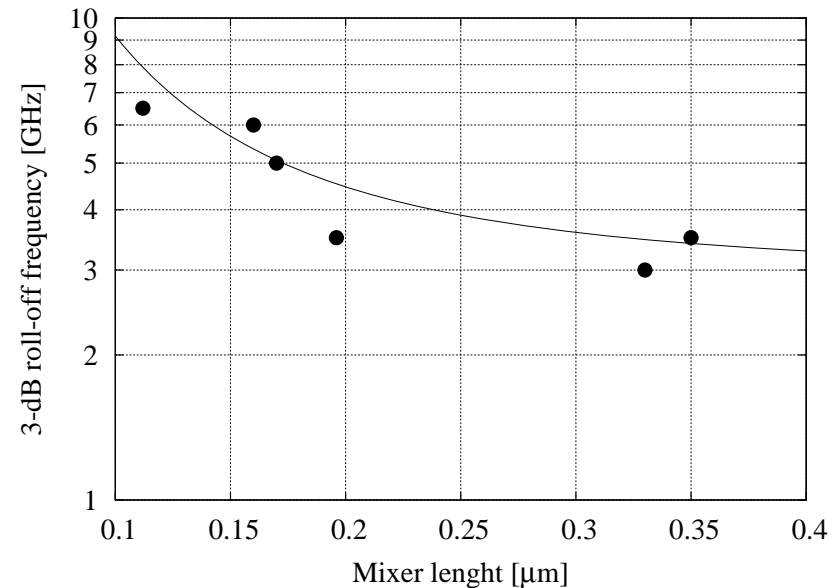
Typical resistance-temperature curves for HEB mixers show, besides the primary superconducting transition, another one at a lower temperature due to the proximity effect between the superconducting film and the normal contact pads.

# Output power vs. IF results obtained at $T = T_c$

The gain bandwidth measurement data for two HEB mixers with different lengths of the mixing element

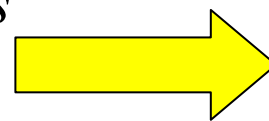


The gain bandwidth as a function of the length of the mixing element. Solid curve is the theoretical dependence.



$$L = 0.15 \mu\text{m} \Rightarrow \tau_{diff} = \frac{L^2}{\pi^2 D} \approx 60 \text{ ps}$$

$$\tau_{phon} \approx 40 \text{ ps}$$

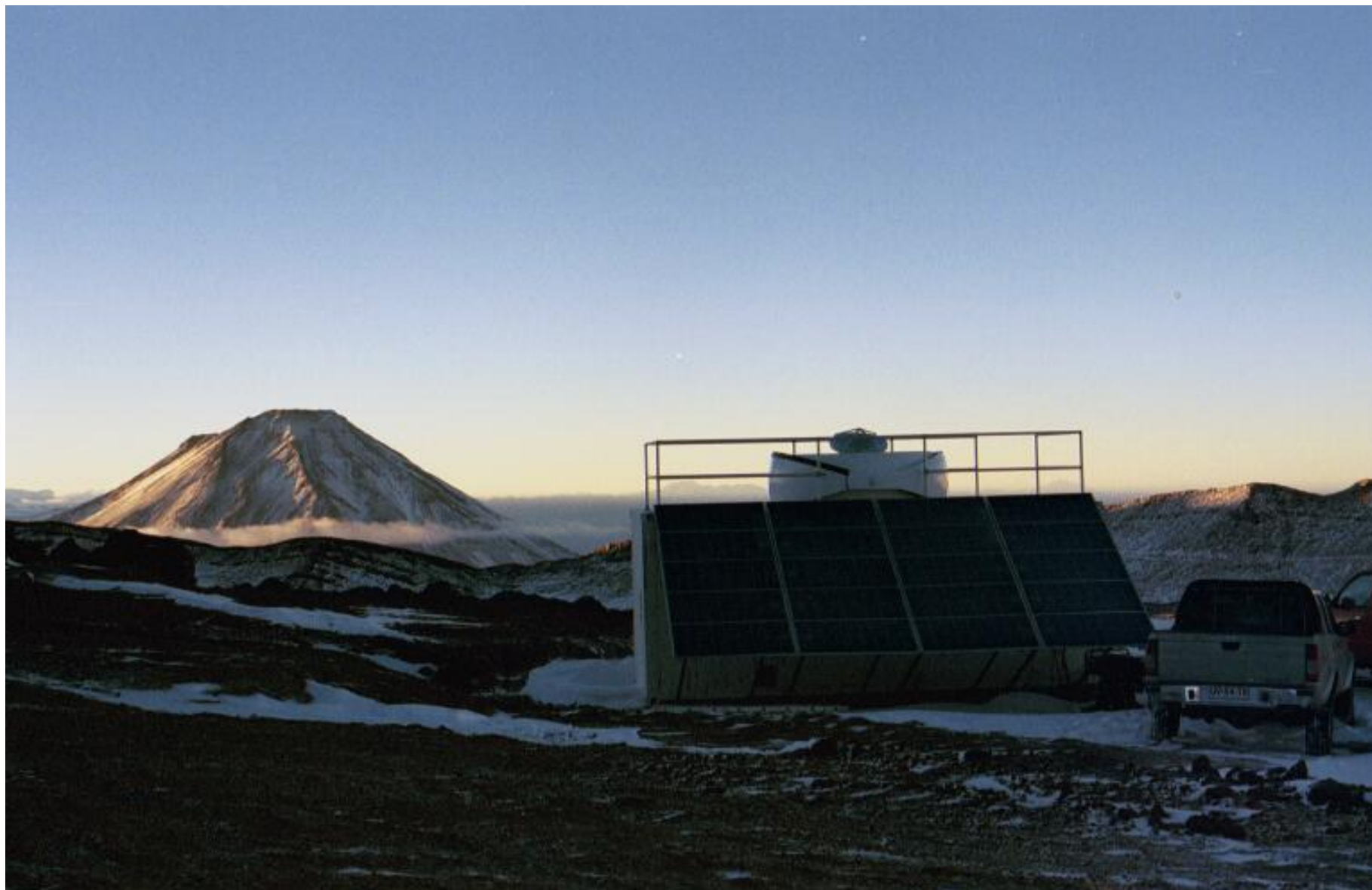


$$\tau_{bol} = \left( \tau_{phon}^{-1} + \tau_{diff}^{-1} \right)^{-1} \approx 25 \text{ ps}$$

$$f_{3dB} = \frac{1}{2\pi\tau_{bol}} \approx 6 \text{ GHz}$$



# 0.83 THz, 1.037 THz, 1.27 THz and 1.46 THz НЕВ приемник в Чили





# Проекты гетродинной астрономии с НЕВ смесителями

## HERSCHEL

3.5-m diameter space telescope  
Bands 6 and 7 of the **HIFI**:  
1.41 THz – 1.91 THz

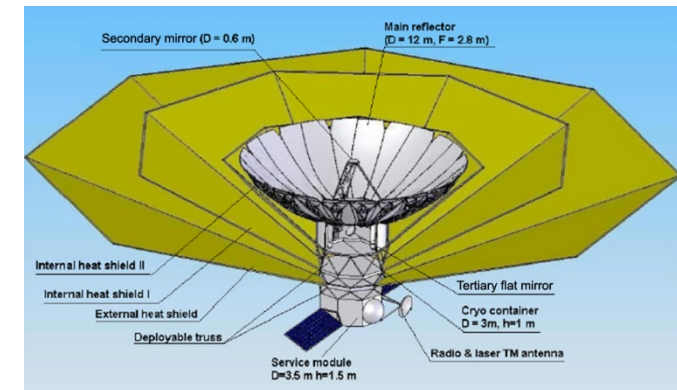


## SOFIA

2.7-m diameter stratospheric telescope  
Heterodyne receivers in the ranges  
1.6-1.9 THz, 2.4-2.7 THz, 4.7 THz

## Millimetron

12-m diameter space telescope  
Heterodyne receivers in 1- 6 THz  
range  
(using 3.5 m diameter central part  
of main mirror)

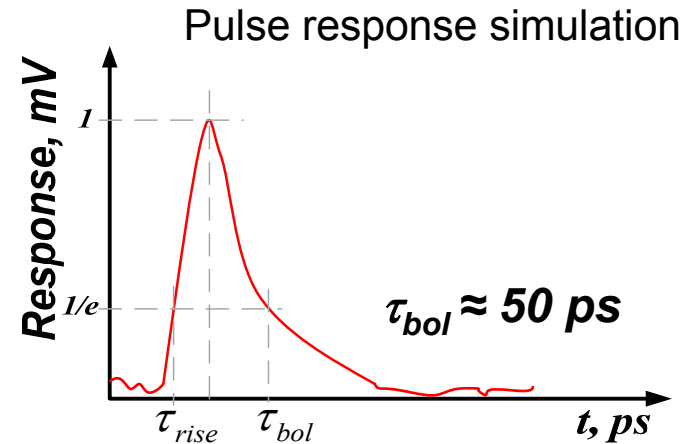
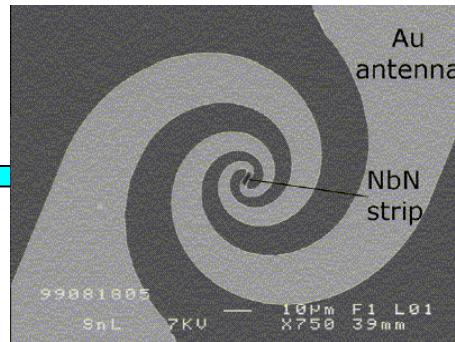
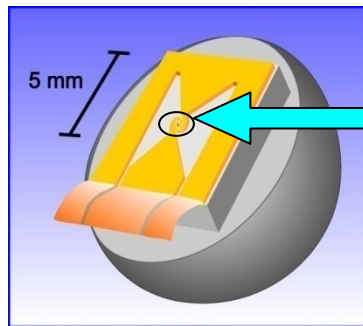


The GBW of the HEB receiver installed at the HERSCHEL telescope does not exceed 4 GHz.  
Future heterodyne missions will require a GBW of 8 GHz.  
**PDHEBs already have a GBW of 6.5 GHz and potentially can have a GBW of up to 12 GHz.**

# Болометры на горячих электронах как прямые детекторы

Способны детектировать атто-Дж импульсы в ГГц диапазоне

Spiral antenna coupled bolometer

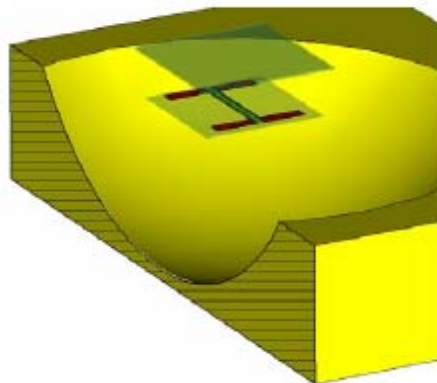


$NEP \approx 3 \times 10^{-13} W/\sqrt{Hz}$

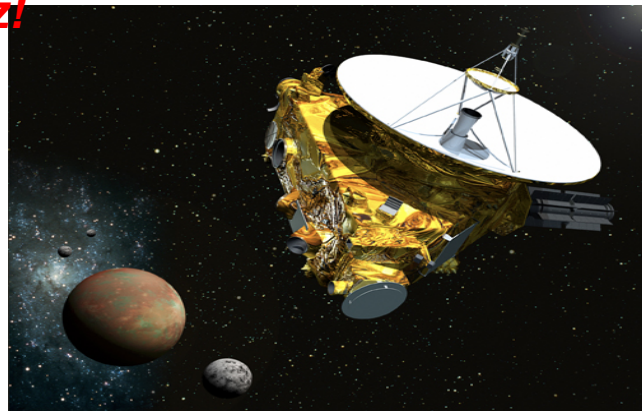
$W_{pulse} = SNR \times NEP \times \sqrt{T_{bol}} \approx 10 aJ < SNR^2 \times h\nu \approx 25 aJ$

**No photon shot noise in THz!**

Signal to noise ratio (SNR)  $\approx 5$  is required for stable link



Double dipole antenna coupled bolometer



**New Horizons:**

**approaching Pluto**  
(artist's view, to happen in summer 2015)

**2.1 m diameter dish antenna to communicate with Earth from 7.5 billion kilometers away**

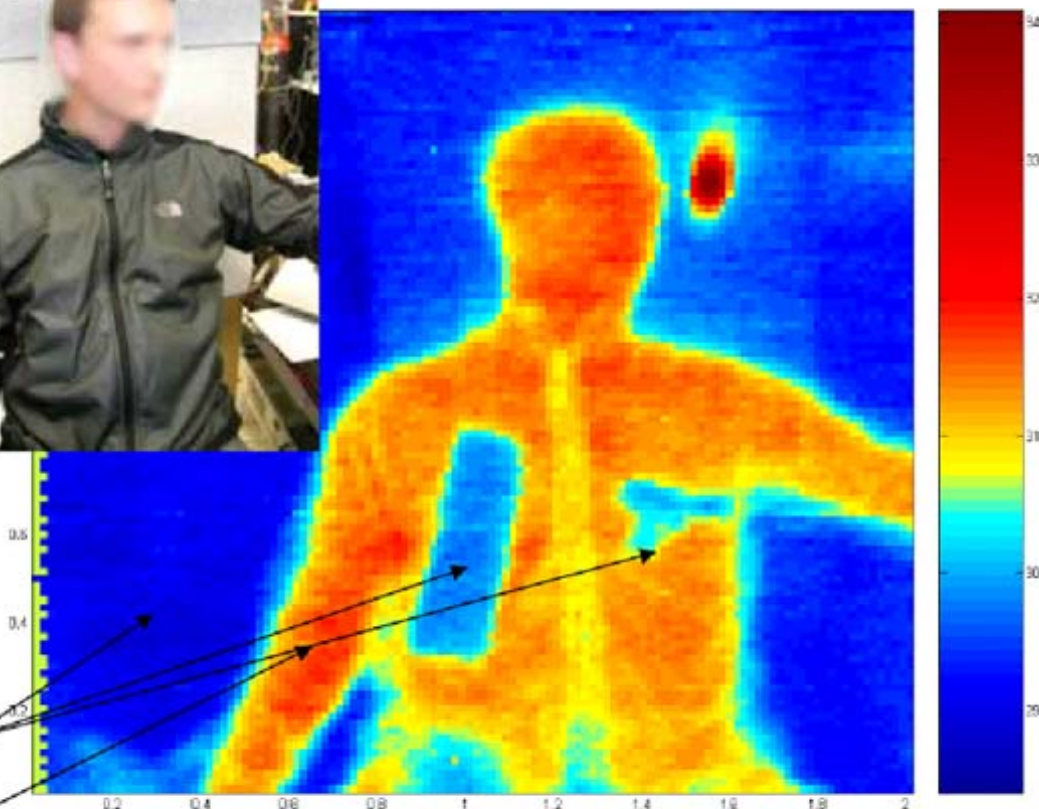
*Credit: Johns Hopkins University Applied Physics Laboratory/Southwest Research Institute (JHUAPL/SwRI)*

# NbN сверхпроводящий однофотонный детектор (SSPD)

## в сравнении с другими детекторами

Detectors	SEMICONDUCTING APDs		SUPERCONDUCTING SPDs	
	Si	InGaAs	SSPD (NbN)	TES (W)
Temperature (K)	300	200	2	0.1
Wavelength ( $\mu\text{m}$ )	0.25-1.1	1.1-1.8	0.4-5.6	0.1-5
Time resolution (ps)	50	~300	20	$3 \times 10^5$
Quantum efficiency	45%@800 nm	30%@1064nm	20%@1.55 $\mu\text{m}$	>80%@1.5 $\mu\text{m}$
Apertures ( $\mu\text{m}$ )	200	m 30-80	SM fiber	SM fiber
Dark count rates (cps)	$<10^4$	$>3 \times 10^4$	$<10^{-4}$	$<0.001$
Data rate	<b>&lt; 10 MHz</b>	<15MHz	>2 GHz	20 kHz
Dynamic range(# $h$ )	1-3000	NA	$>10^8$	50
Electrical quenching	Yes (0.3 ns)	Yes (0.3 ns)	No	No
Photon number resolution	Limited	No	<b>Yes</b>	Yes
Ruggedness	Very high	High	High	Low
Availability	Yes	Limited	Limited	Very limited

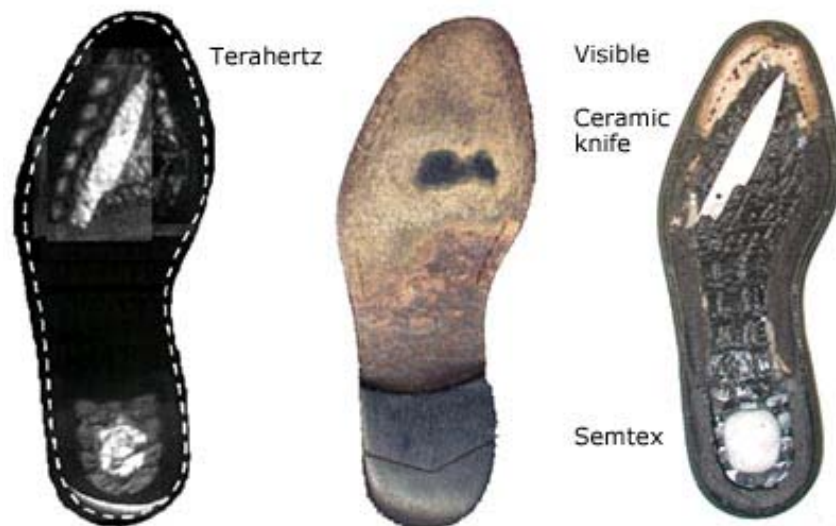
# Изображающая система, основанная на прямом детектировании (VTT Information Technology of Finland)



Background (reflected by concealed objects) at room temperature

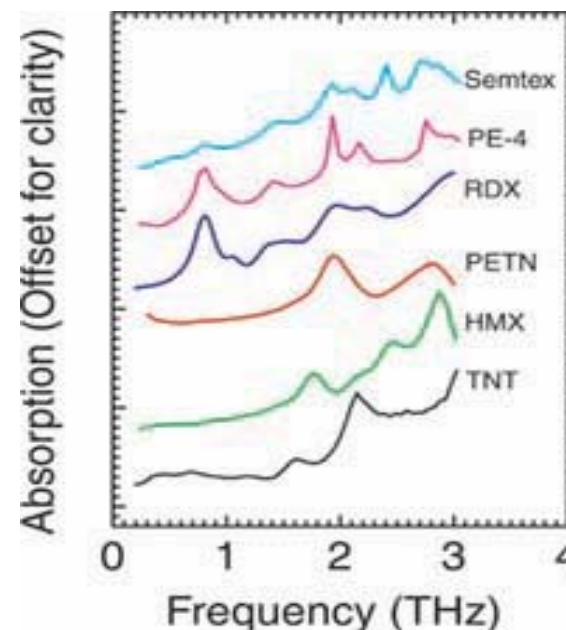
Skin at body temperature

# Применение в системах безопасности



The THz image of hidden ceramic knife and explosive in the shoes. To the right is the image of same shoe without sole.

<http://www.teraview.co.uk>



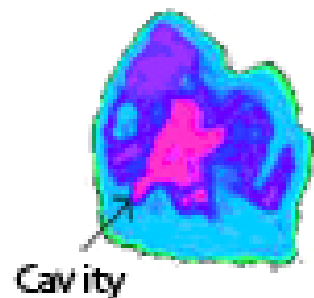
Detection of explosives and materials characterization. The figure presents spectral characteristics of different explosives.

# Биомедицинские приложения терагерцовых приемников

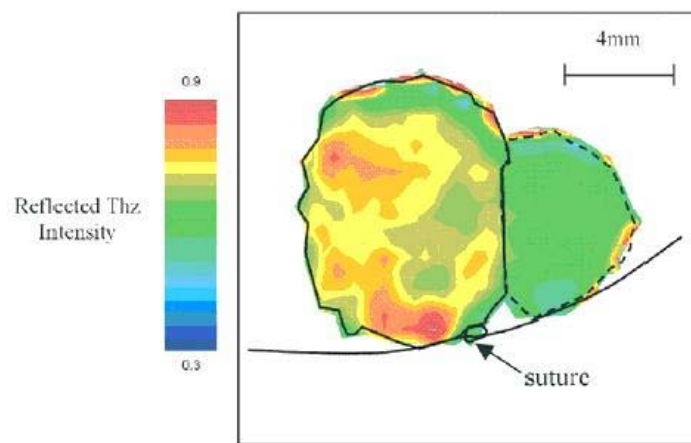
Visible image of human tooth



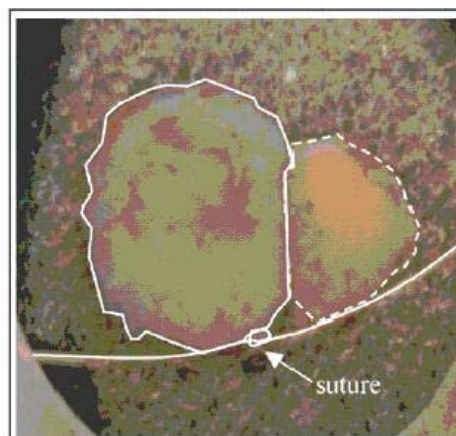
Terahertz image of cavity in human tooth



THz imaging for cavity diagnostics of human tooth.



THz image



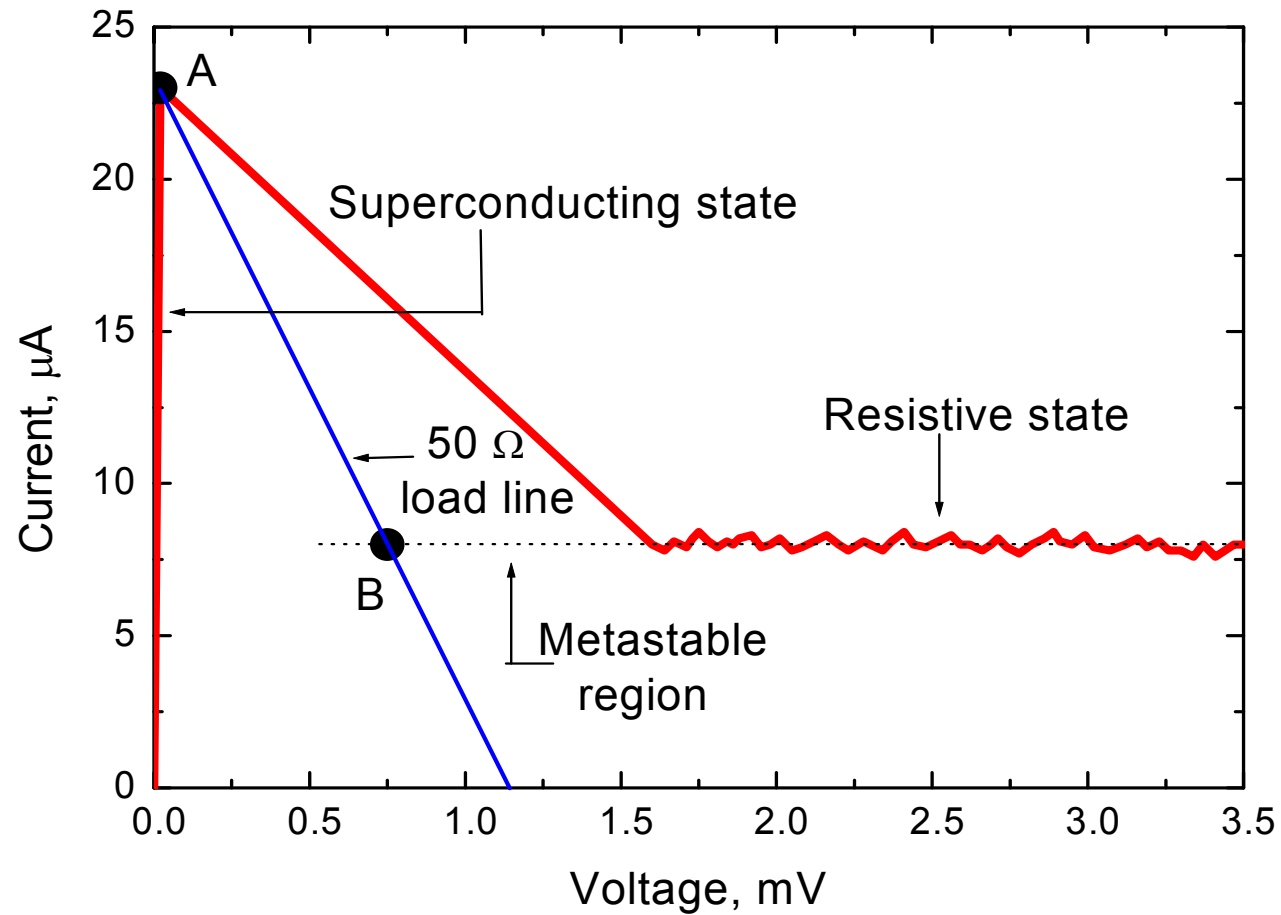
Visible Image

Non-invasive molecular imaging of epithelial cancer. The THz image of basal cell carcinoma (BCC). The red areas indicate areas of cancer

Х а р а к т е р и с т и к и 4-н м п л е н к и

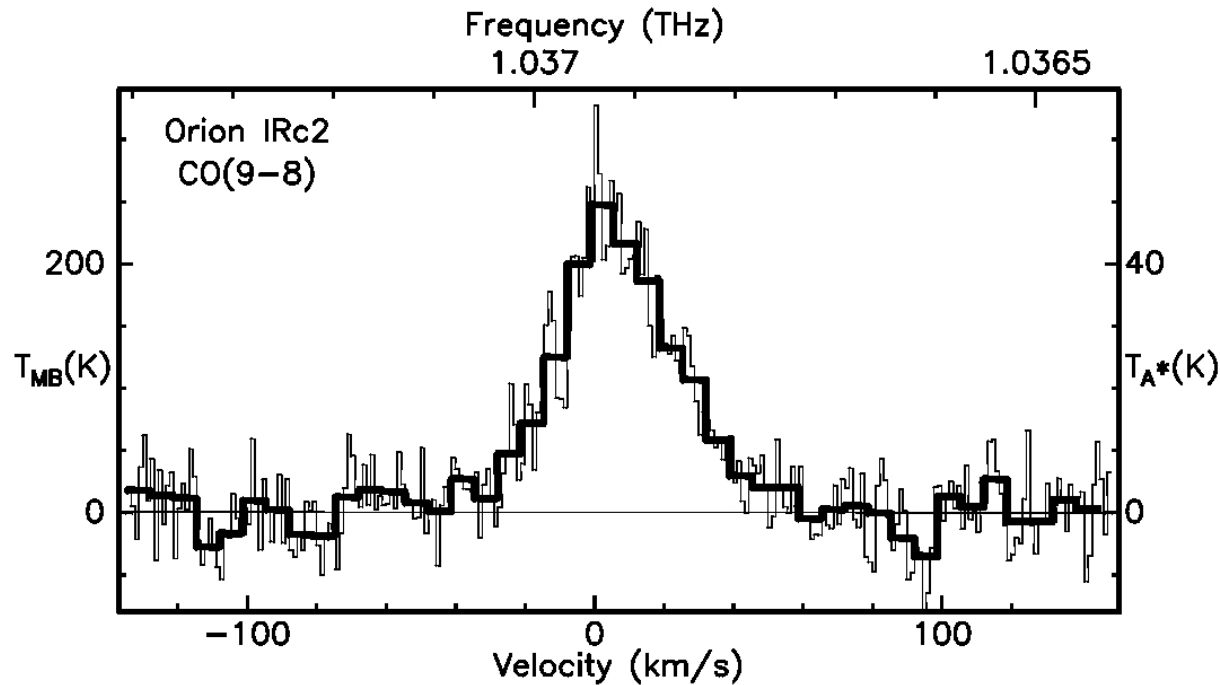
NbN

п р и 4.2 К





# HEB смесители для наземной астрономии



10-meter the Heinrich Hertz Telescope (HHT) on Mt. Graham (Arizona, USA)

First fully-resolved ground-based detection of a terahertz spectral line from an astronomical source (CO 9-8 in Orion BN/KL) was obtained with the HEB receiver (January 2000). **The first ground-based heterodyne detection in the terahertz band.**

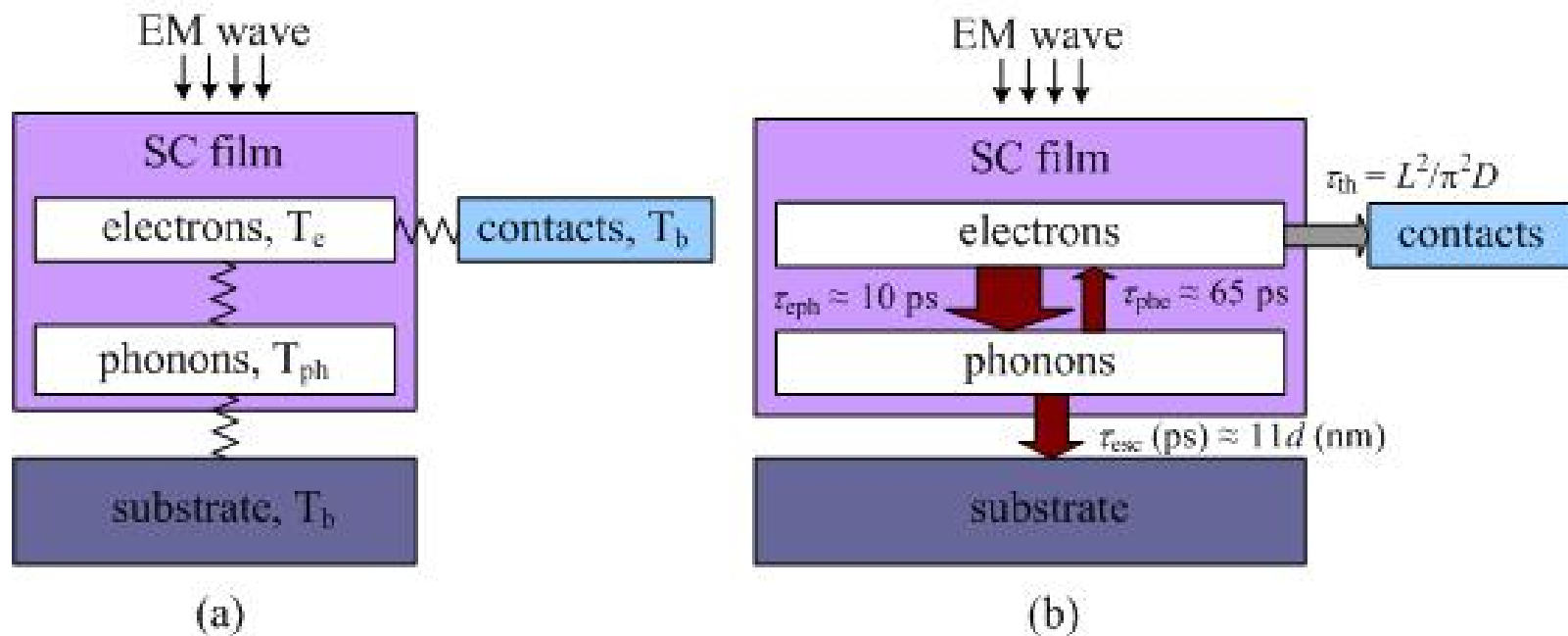
<http://www.cfa.harvard.edu/srlab/rxlabHEB.html>

<http://www.cfa.harvard.edu/srlab/secure/rxlabTerahertzScience.html>

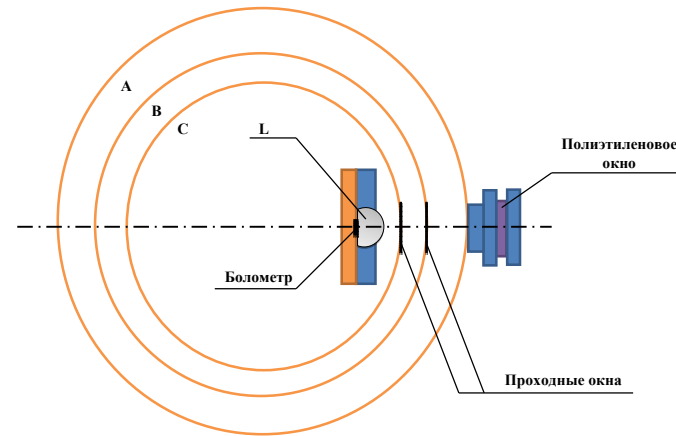
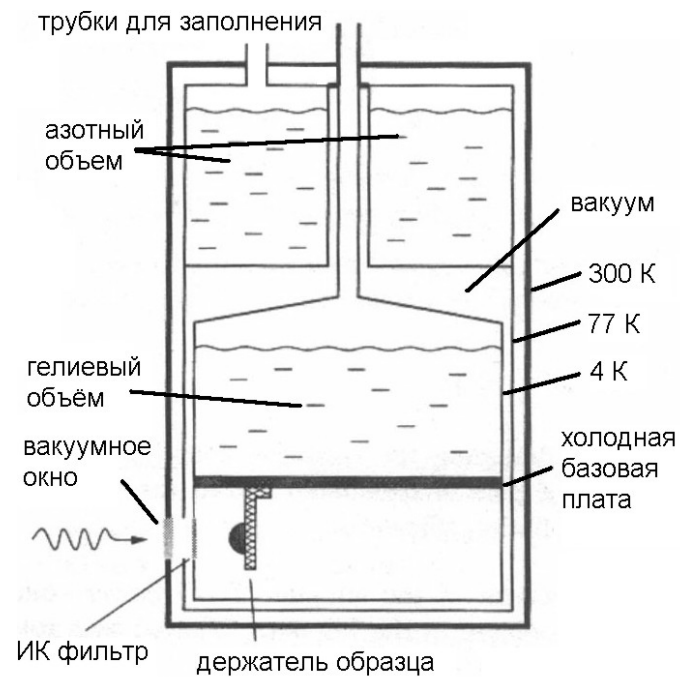


# Криогенный NbN болометр на Новосибирском ЛСЭ - 1

Два режима работы болометра на основе NbN

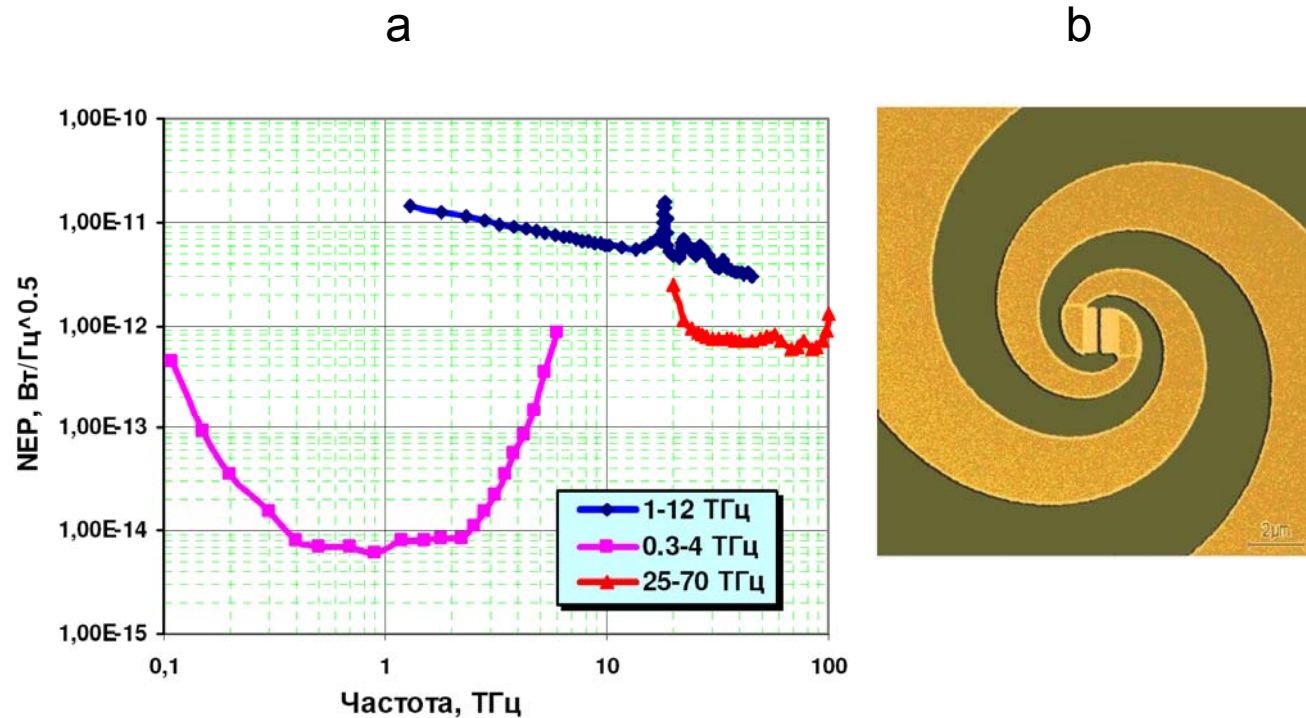


# Криогенный NbN болометр на Новосибирском ЛСЭ 1



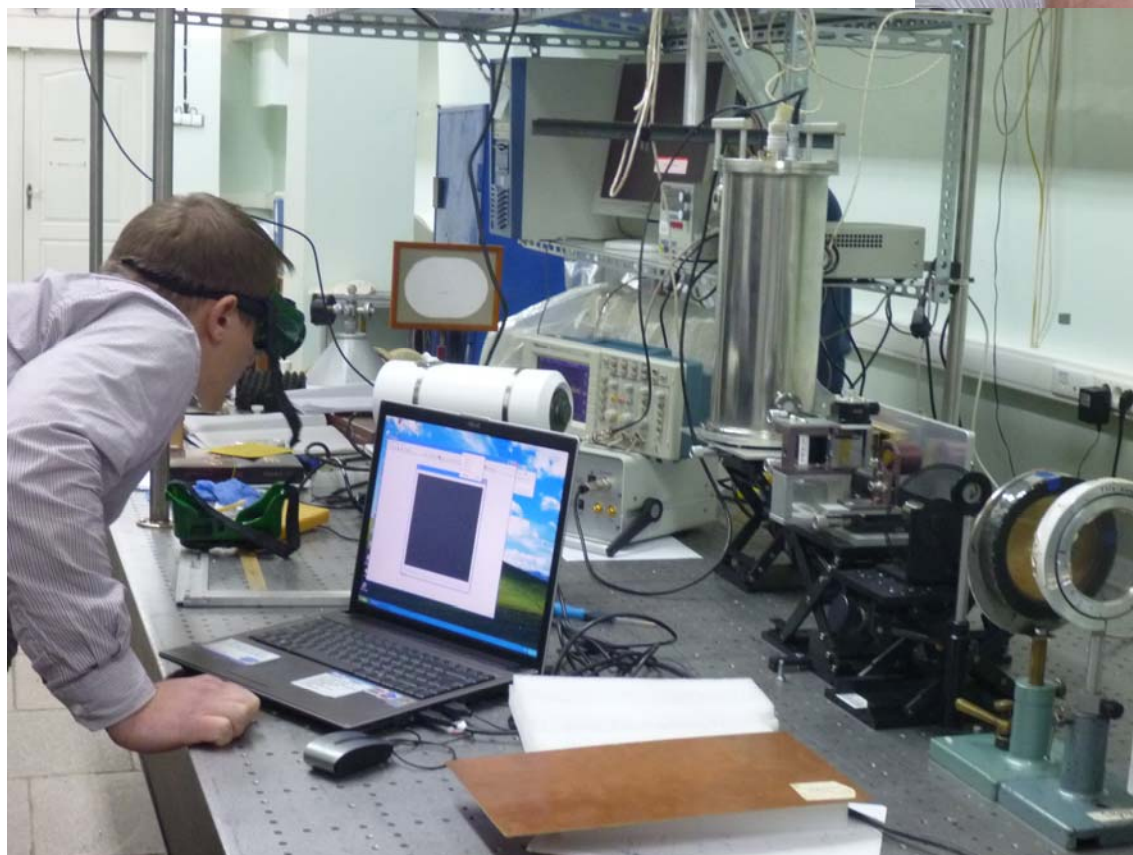
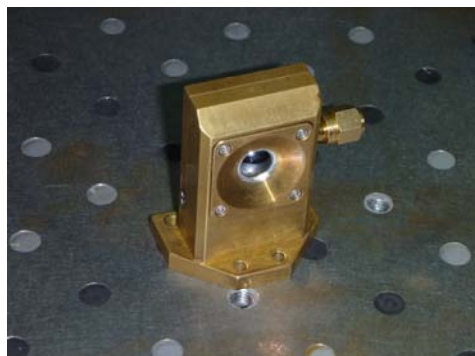
Устройство болометра

# Криогенный NbN болометр на Новосибирском ЛСЭ - 3



(а) Чувствительность детектора как функция частоты падающего излучения для трех модификаций устройства (в нашем случае это – первый вариант);  
(б) приемная антенна с детектором

# Криогенный NbN болометр на Новосибирском ЛСЭ - 4



Применение NbN болометра для исследования радиационных потерь при распространении поверхностных плазмон-поляритонов по изогнутым поверхностям

В лекционном курсе использованы материалы из следующих источников:

(не упоминаются источники, происхождение которых указано на слайдах)

- Лекция А. П. Шкуринова (Лазерный центр МГУ)
- Доклад О. А. Шевченко
- Презентация группы Г.Н. Гольцмана
- Brundermann и др. Terahertz Techniques, Springer, 2012.
- Guenther. Optics.
- Сайт Элементы.ру
- Доклады и статьи пользователей «Сибирского центра синхротронного и терагерцового излучения»
- Рисунки и фотографии с разных сайтов интернета

а также ряд материалов из источников, происхождение которых сейчас трудно установить

**Автор благодарит известных и неизвестных авторов всех использованных источников**