

# Физические основы построения сверхвысокочувствительных адаптивных измерительных систем на основе динамических голограмм

Ю. Н. Кульчин, Р.В.Ромашко



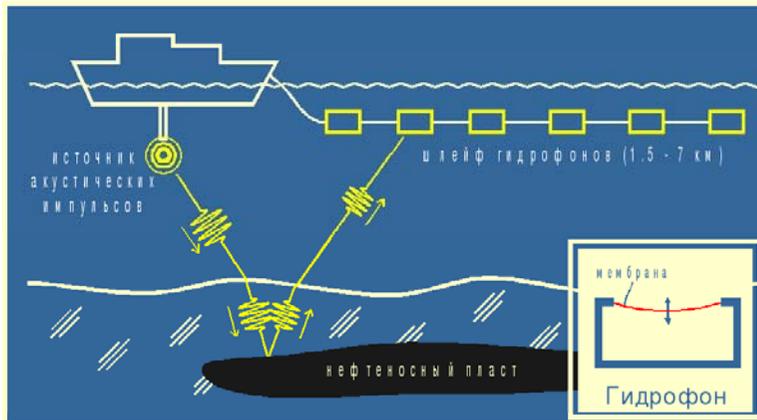
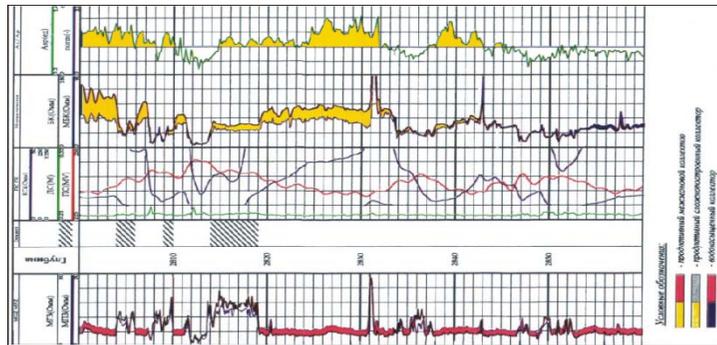
Институт автоматки и процессов управления ДВО РАН

## План доклада:

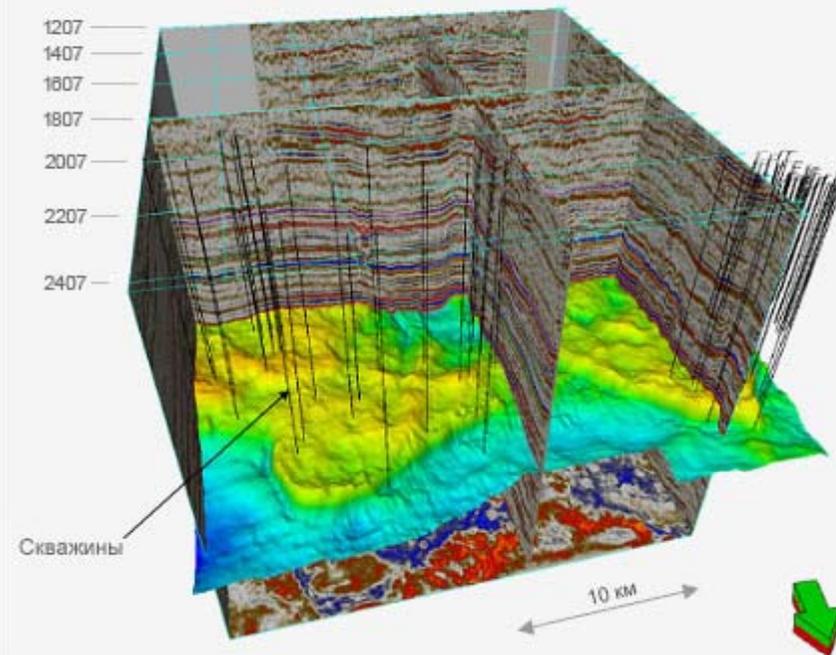
- Актуальность исследования: области применения от «МАКРО» до «НАНО»
- Адаптивные измерительные системы (АИС) на основе динамических голограмм (ДГ)
- Переход к диффузионным ДГ
- АИС на основе ортогональных динамических голограмм
- Многоканальные АИС
- Заключение

# Общие НТ задачи и проблемы: МАКРО

## Проблемы геофизики и геологии: поиск полезных ископаемых / сейсморазведка

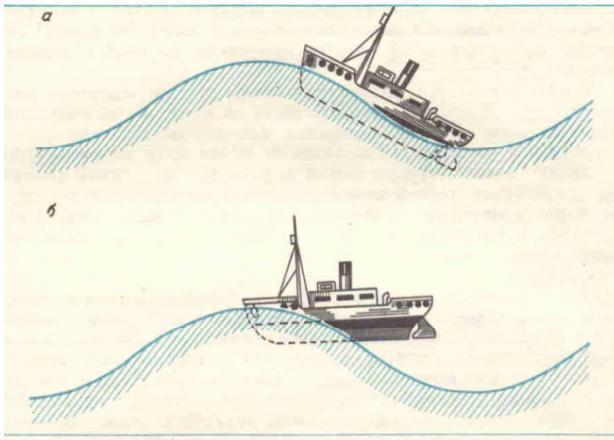


Образец сеймики Оренбурга  
Сейсмический куб



# Общие НТ задачи и проблемы: МАКРО

## Предотвращение кораблекрушений: мониторинг состояния корпуса судна



# Общие НТ задачи и проблемы: МАКРО

**Предотвращение инженерно-технических катастроф:  
мониторинг состояния дамб, плотин, мостов, туннелей, шахт...**



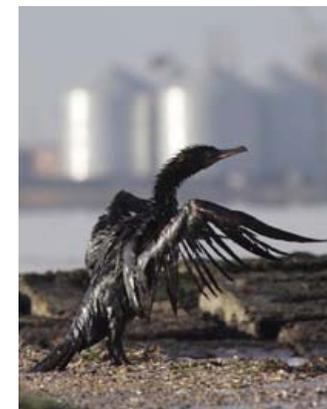
# Общие НТ задачи и проблемы: МАКРО

**Предотвращение техногенных аварий и катастроф:  
мониторинг состояния технических конструкций**



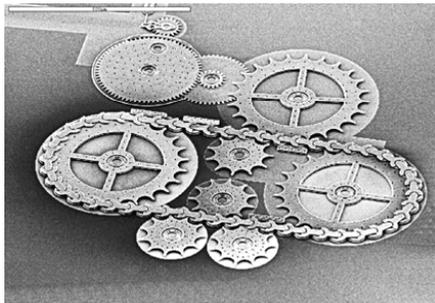
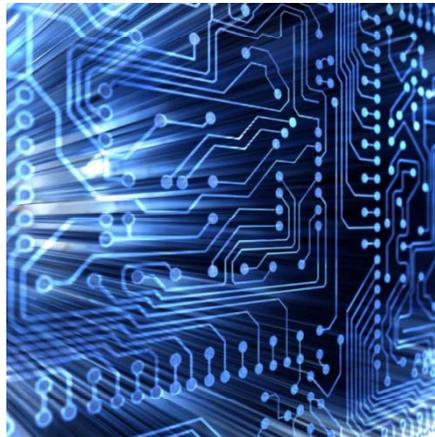
# Общие НТ задачи и проблемы: МАКРО

**Предотвращение разрушений нефте- и газопроводов:  
мониторинг состояния сварных соединений труб.**

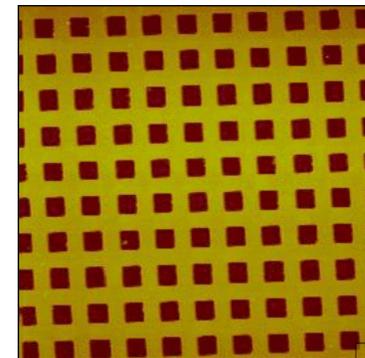
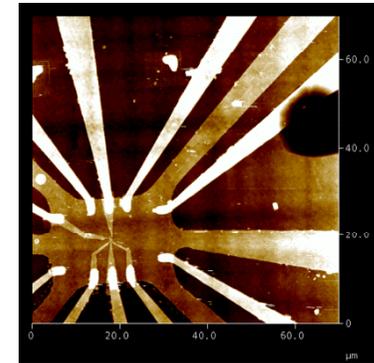
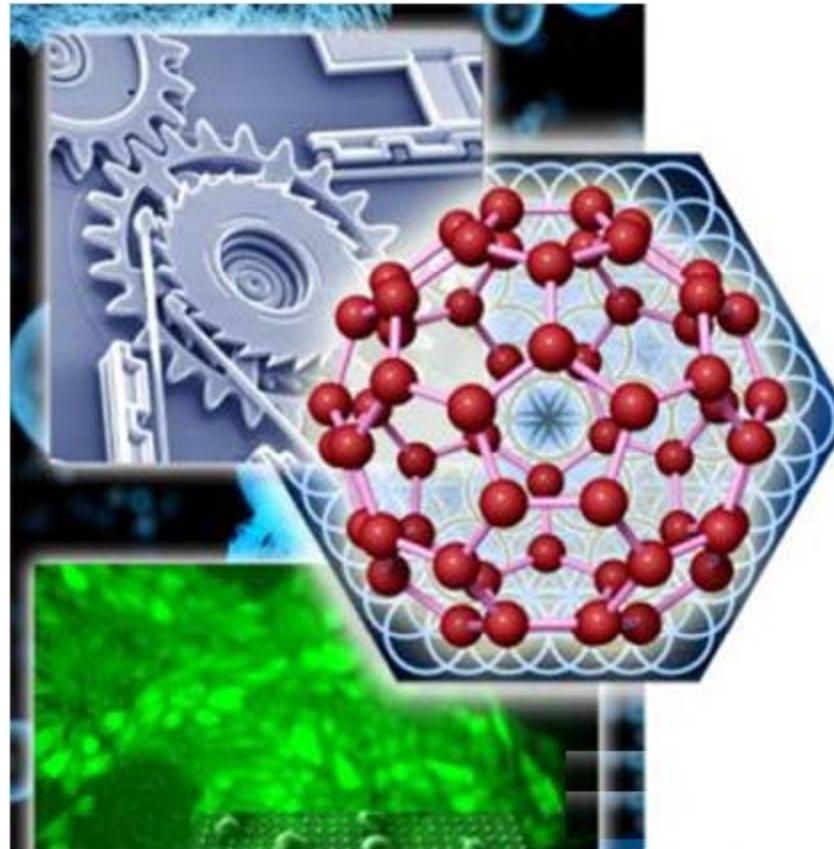


# Общие НТ задачи и проблемы: МИКРО и НАНО

## Обеспечение производственных процессов в нано- и микроэлектронике



The centers of the links in Sandia's microchain are 50  $\mu\text{m}$  apart. The chain can run for 500  $\mu\text{m}$  unsupported by gears or bracing. A microchain tensioner is needed to accommodate longer spans (photo by Barry Ritchey of Sandia Labs)

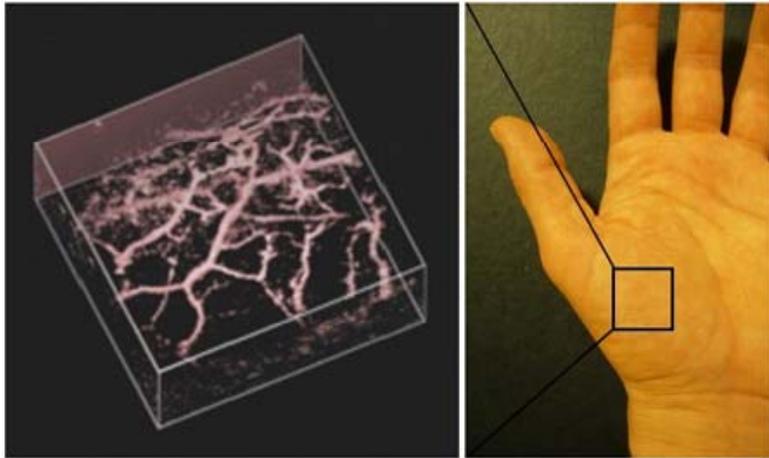


# Общие НТ задачи и проблемы: МИКРО и НАНО

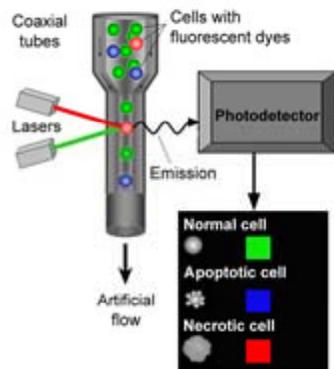
**Детектирование слабых физических сигналов:**

**... акустических,**

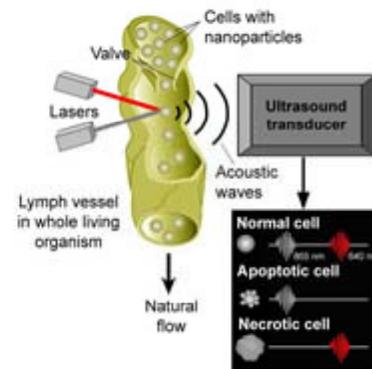
**... гидроакустических**



**Conventional  
flow cytometry *ex vivo***



**Photoacoustic lymph  
flow cytometry *in vivo***

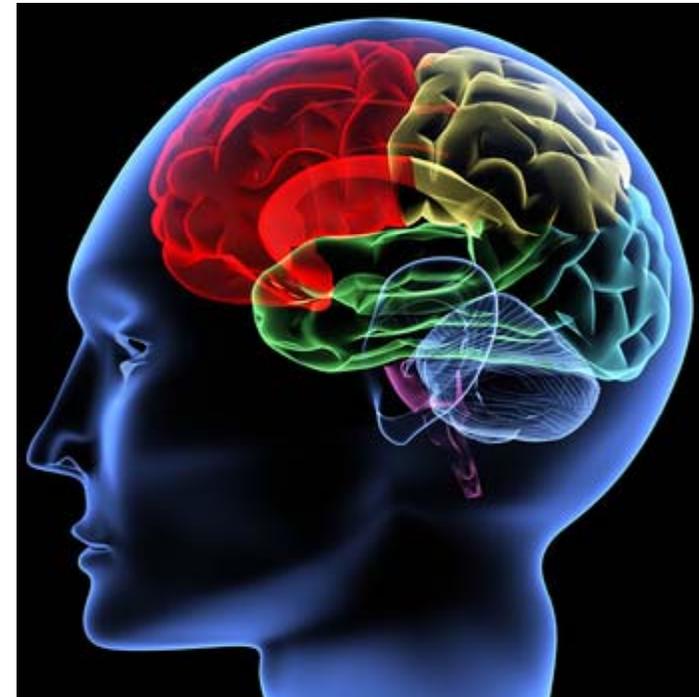
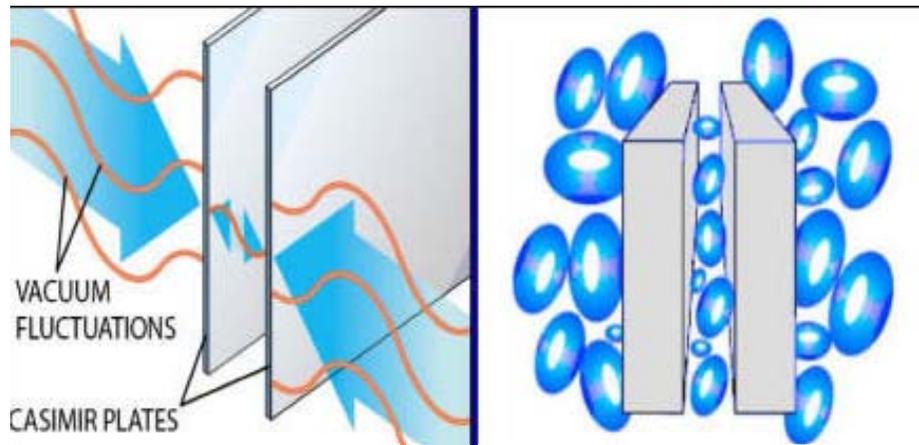




# Общие НТ задачи и проблемы: МИКРО и НАНО

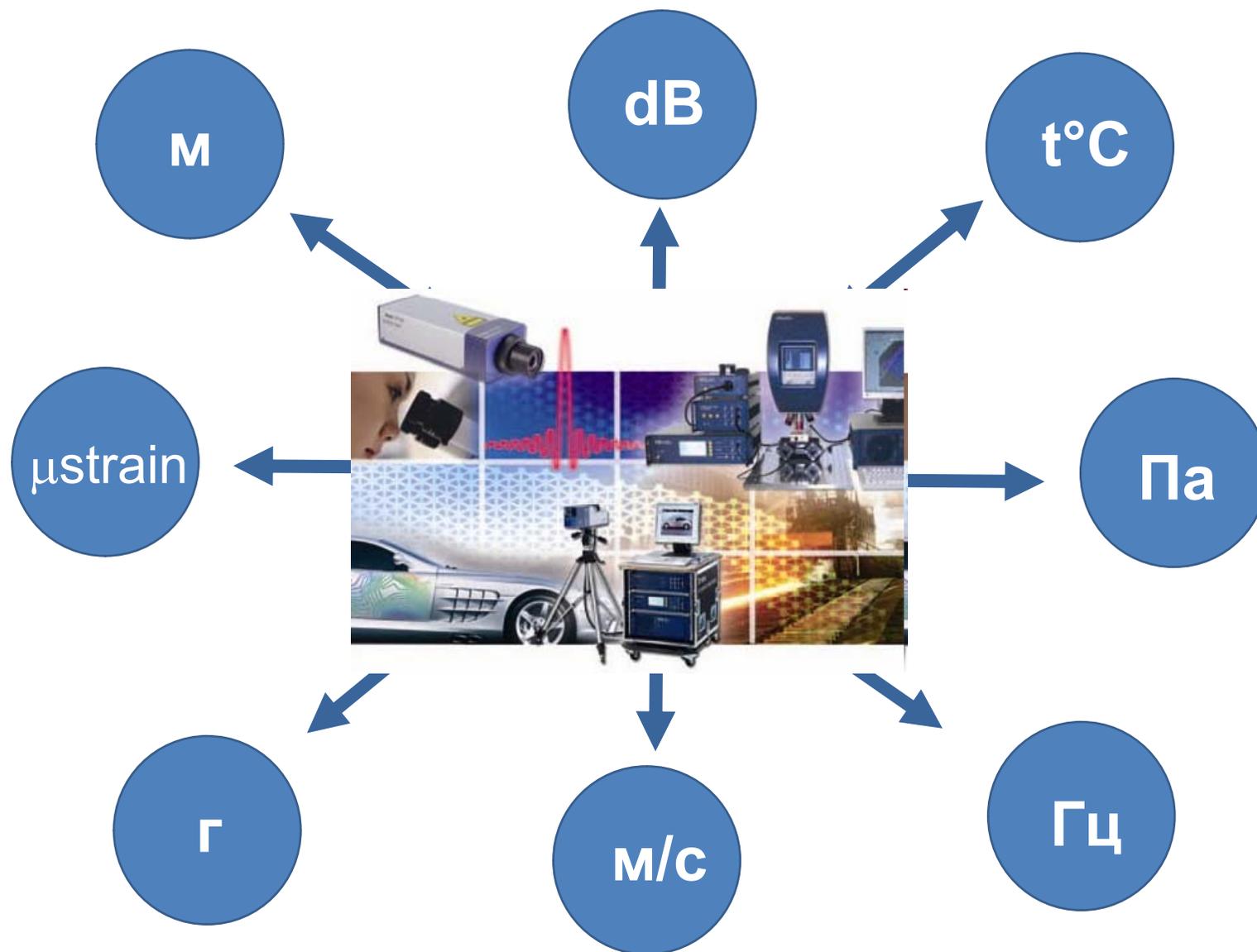
**Детектирование слабых физических сигналов:**

**... квантовых флуктуаций вакуума,**



**...слабых электромагнитных полей и пр.**

# Измерительные системы



# Лазерная интерферометрия

Наиболее чувствительный метод для измерения сверхмалых величин

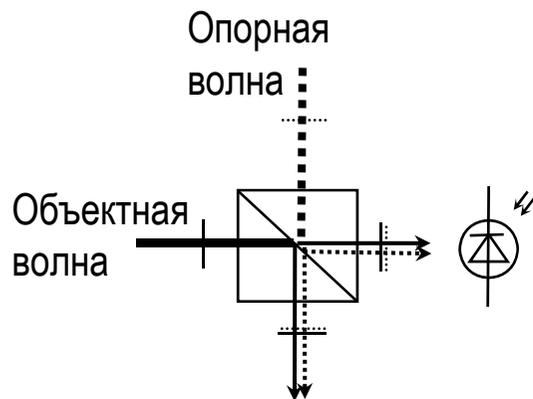
Порог чувствительности в классическом гомодинном интерферометре

$$\varphi_{\text{lim}} = 1,5 \times 10^{-9} \text{ рад } \sqrt{\text{Вт/Гц}}$$

Пример: Детектирование смещений поверхности

При оптической мощности в 1 мВ ( $\lambda = 0,5 \text{ мкм}$ ),  
могут быть зарегистрированы смещения

Достигим  
ли этот  
порог?



$$3,1 \times 10^{-12} \text{ м}$$

- в широкой полосе частот (20 МГц)

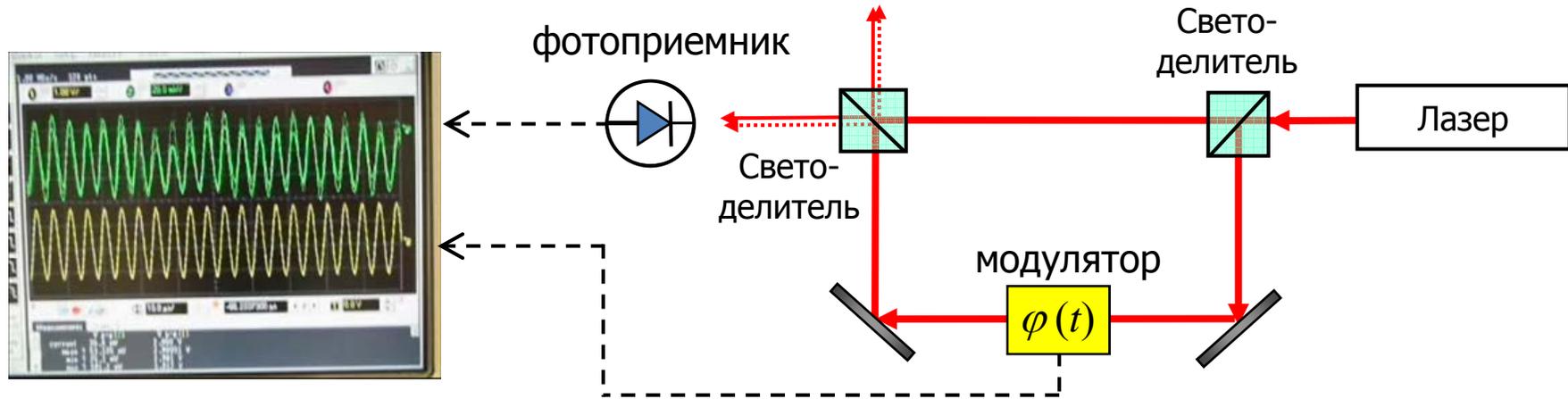
$$0,7 \times 10^{-15} \text{ м}$$

- в узкой полосе частот (1 Гц)

Интерферометр открывает потенциальную возможность регистрации физических величин **пико-** и **фемто-** масштаба!

...вибрации, деформации, смещения, напряженности силовых полей, давления, и мн.др.

# Классический гомодинный интерферометр: Проблема №1

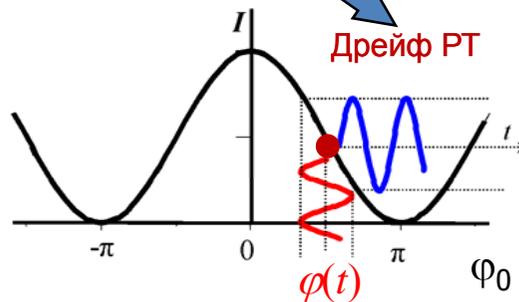


$$I = I_0 \{1 + m \cos[\varphi(t) + \varphi_0]\}$$

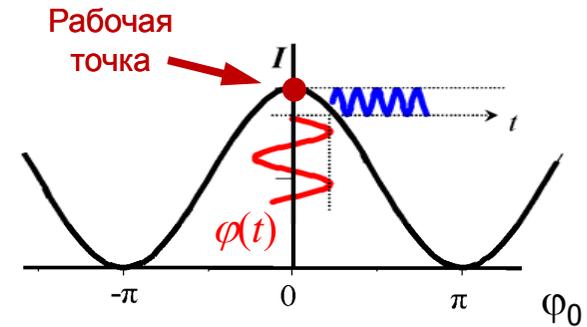
Проблема №1

$$\varphi_{lim} = 1,5 \times 10^{-9} \text{ рад } \sqrt{\text{Вт/Гц}}$$

Достигим ли этот порог?



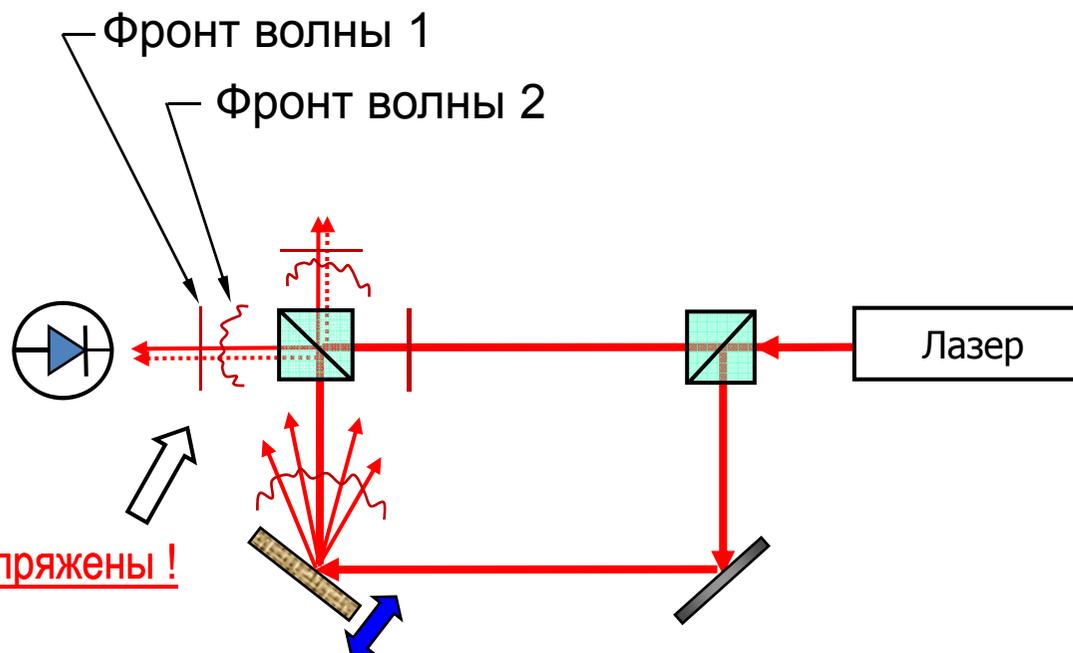
Линейная демодуляция



Квадратичная демодуляция

# Классический гомодинный интерферометр: Проблема №2

Необходимо обеспечить сопряжение волновых фронтов



$$\varphi_{\text{lim}} = 1,5 \times 10^{-9} \text{ рад } \sqrt{\text{Вт/Гц}}$$

Достигим ли этот порог?

## Две ключевые проблемы классического интерферометра:

- 1: Стабилизация положения рабочей точки
- 2: Сопряжение разных волновых фронтов

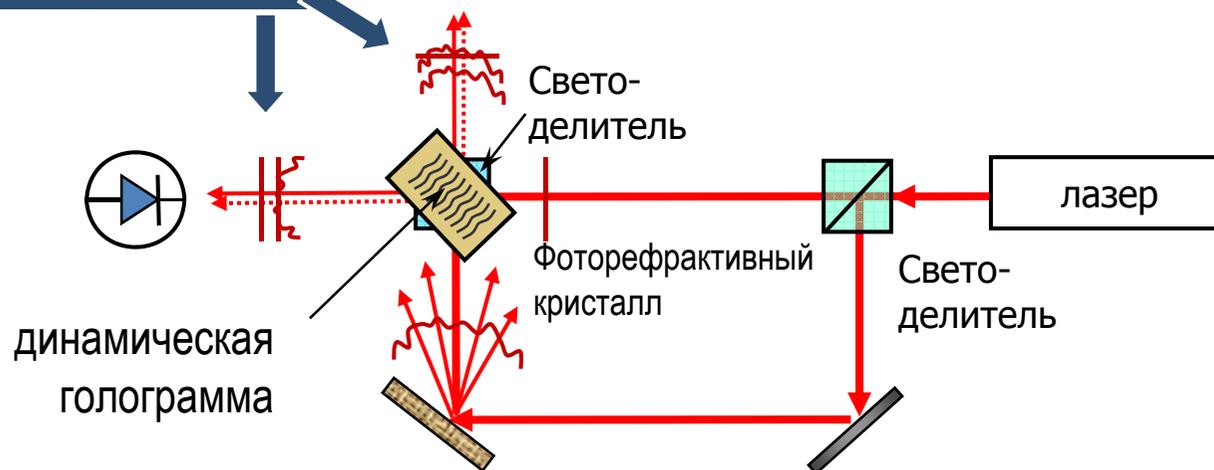
## Комплексное решение:

Построение адаптивного интерферометра на основе использования динамических голограмм.

# Адаптивный интерферометр (АИ): сопряжение волновых фронтов

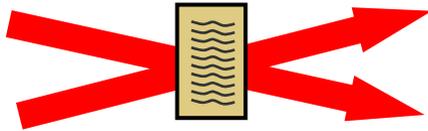
Волновые фронты сопряжены!

Фоторефрактивный эффект: обратимое изменение показателя преломления материала под действием света с неоднородным распределением интенсивности.



# Адаптивный интерферометр (АИ): стабилизация рабочей точки

Фоторефрактивный  
кристалл (ФРК)



Динамическая  
голограмма

$\tau_R$  - время записи динамической голограммы в ФРК

$T$  - характерное время модуляции фазы волны  $\varphi(t)$

$T > \tau_R$  (медленная модуляция)

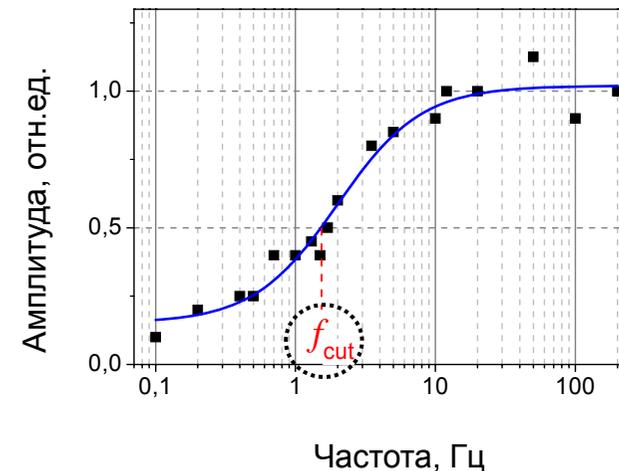
Голограмма перезаписывается => нет  
сигнала демодуляции

$T < \tau_R$  (быстрая модуляция)

Голограмма “заморожена”=> есть  
сигнал демодуляции

Фильтр верхних частот (ФВЧ)  
с частотой отсечки:

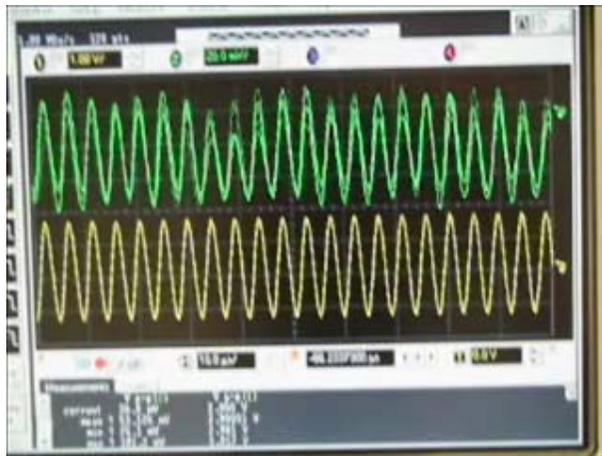
$$f_c = \frac{1}{2\pi\tau_R} \sim I$$



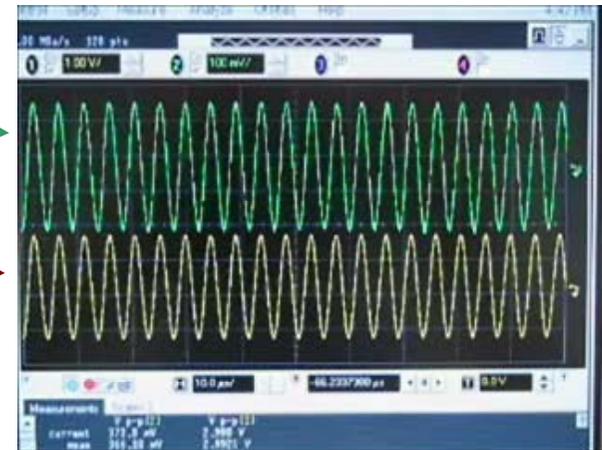
АЧХ адаптивного интерферометра

# Адаптивный интерферометр (АИ): стабилизация рабочей точки

Классический интерферометр



Адаптивный интерферометр



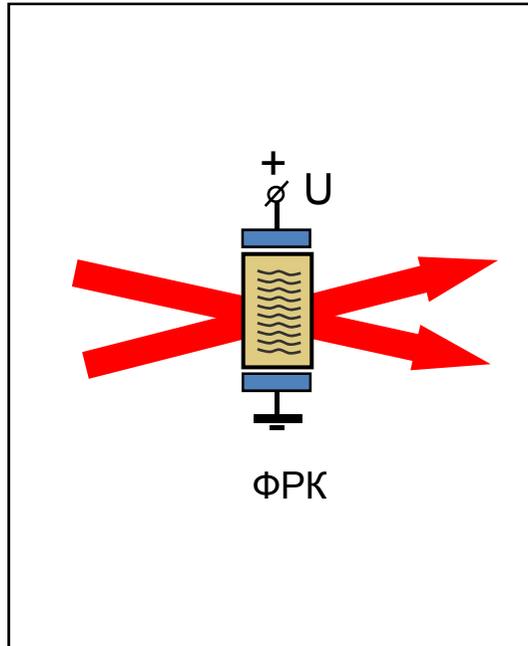
← детектируемый сигнал →

← модуляция →

вibrации  
смещения  
деформации

...

# Нерешённые проблемы АИ (1)



## Сильное электрическое поле (~ 10 кВ/см !) требуется для

- 1) Реализации линейного режима фазовой демодуляции (квадратурных условий АИ)
- 2) Усиления двухволнового взаимодействия в ФРК



## Технические проблемы

- 1) Перегрев кристалла (вплоть до разрушения)
- 2) Экранирование постоянного электрического поля
- 3) Повышенное энергопотребление
- 4) Усложнение системы

## II АИС на основе отражательных диффузионных голограмм

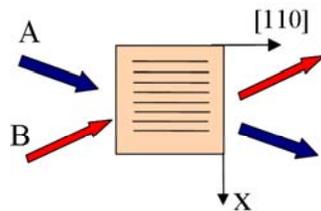
Особенность диффузионных голограмм, формируемых в ФРК без внешнего электрического поля:

1. Низкая эффективность взаимодействия
2. Отсутствие квадратурных условий

**Решение 1: переход к отражательной геометрии формирования голограмм**

$\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$   
 $\lambda = 633 \text{ нм}$

Пропускающая геометрия



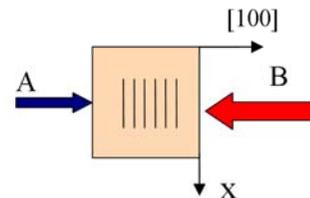
Коэффициент двухволнового взаимодействия

$$\Gamma = -\frac{\pi n_0^3 r_{41}}{\lambda} \frac{2\pi kT}{\Lambda e}$$

$\Lambda \sim 1-10 \text{ мкм}$

$\Gamma \sim 1 \text{ см}^{-1}$

Отражательная геометрия



$\Lambda$  - пространственный период голографической решетки

$\Lambda \sim 0.12 \text{ мкм}$

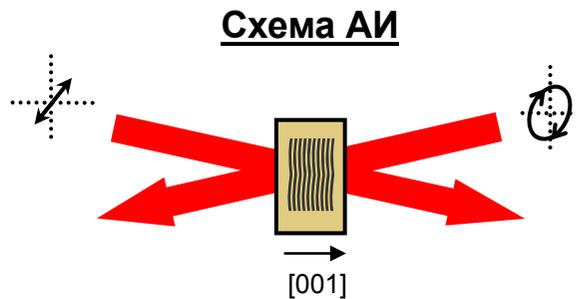
$\Gamma \sim 8 \text{ см}^{-1}$

# АИ на основе отражательной диффузионной голограммы

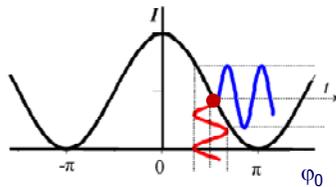
Особенность диффузионных голограмм, формируемых в ФРК без внешнего электрического поля:

1. Низкая эффективность взаимодействия
2. Отсутствие квадратурных условий

**Решение 2: переход к векторному взаимодействию волн с разным типом поляризации**



Отражательная геометрия

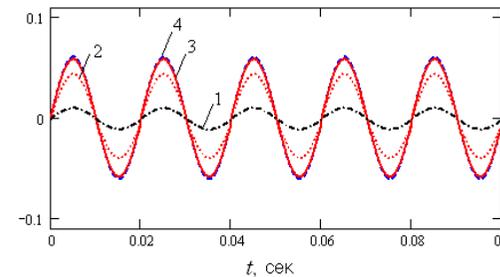


Система уравнений связанных волн:

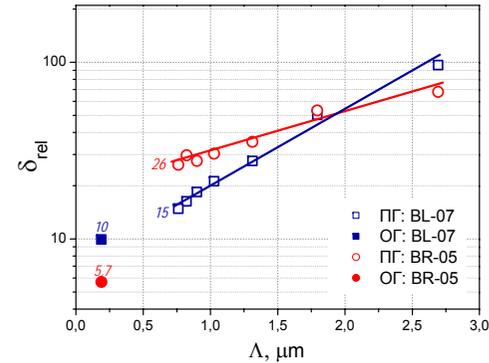
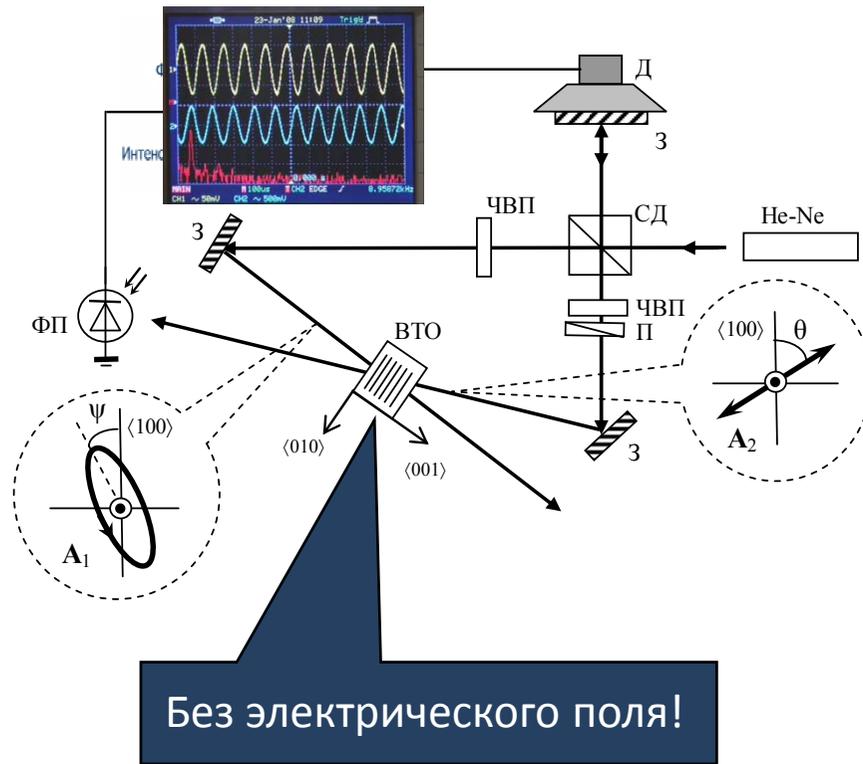
$$\begin{cases} \left( \frac{\partial}{\partial z} + \frac{\alpha}{2} \right) \vec{A}_1 + \epsilon \vec{A}_1 = -\kappa_D m \mathbf{H} \vec{A}_2, \\ -\left( \frac{\partial}{\partial z} + \frac{\alpha}{2} \right) \vec{A}_2 + \epsilon \vec{A}_2 = \kappa_D m^* \mathbf{H} \vec{A}_1, \end{cases} \quad \mathbf{H} = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$$

Изменение интенсивности объектной волны

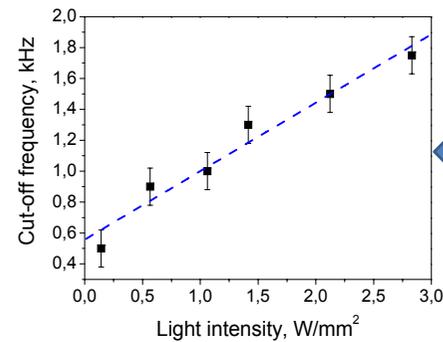
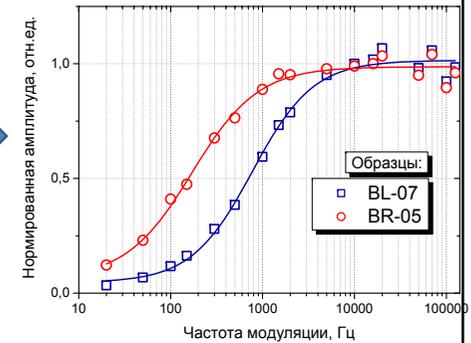
$$\Delta I_1(\varphi) \approx -2\kappa_D L I_0^{-1} [b_s b_p (a_s^2 - a_p^2) + \sin \tilde{\alpha} \cdot a_s a_p (b_s^2 - b_p^2)] \times \varphi$$



# АИ на основе отражательной диффузионной голограммы



АЧХ адаптивного интерферометра на основе отражательной голограммы, сформированной в CdTe



# Порог детектирования АИ

Теоретический порог  
детектирования в **классическом  
интерферометре** (неадаптивном,  
свободном от потерь)

$$\varphi_C^{\text{lim}} = 4.5 \times 10^{-10} \text{ рад } \sqrt{\text{Вт/Гц}}$$

← только  
дробовый шум →

$$\delta = \frac{\varphi_A^{\text{lim}}}{\varphi_C^{\text{lim}}} = 5.7$$

Теоретический порог  
детектирования в

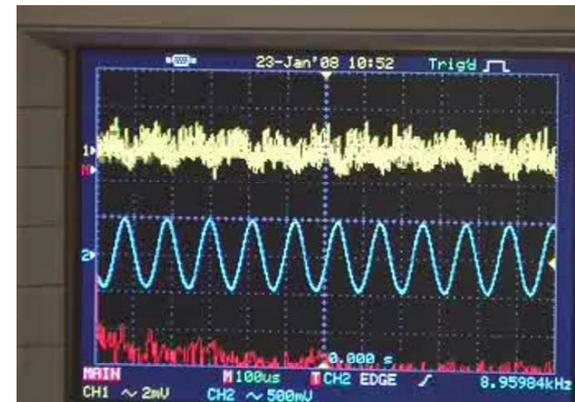
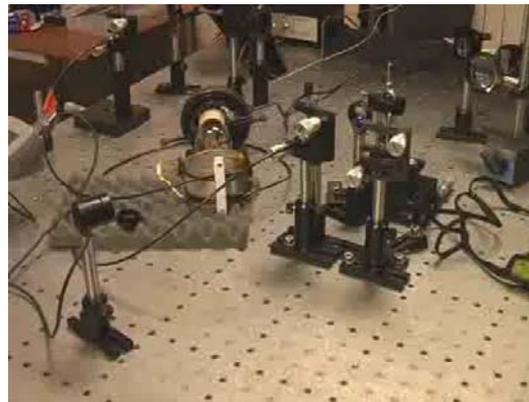
**адаптивном интерферометре**

$$\varphi_A^{\text{lim}} = 26 \times 10^{-10} \text{ рад } \sqrt{\text{Вт/Гц}}$$

# Работа АИ в условиях сильного теплового воздействия

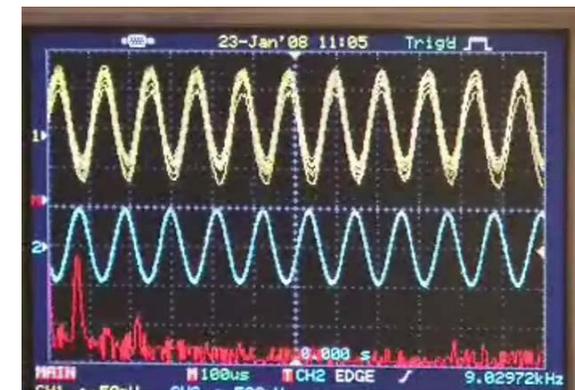
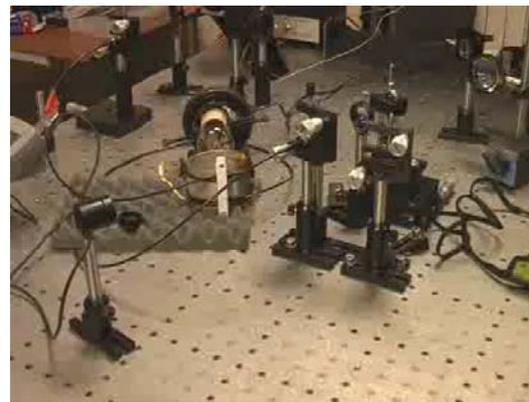
Измерения вибраций амплитудой **10 нм (!)**

**Нет стабилизации**  
(классический  
интерферометр)



↕ 2 мВ

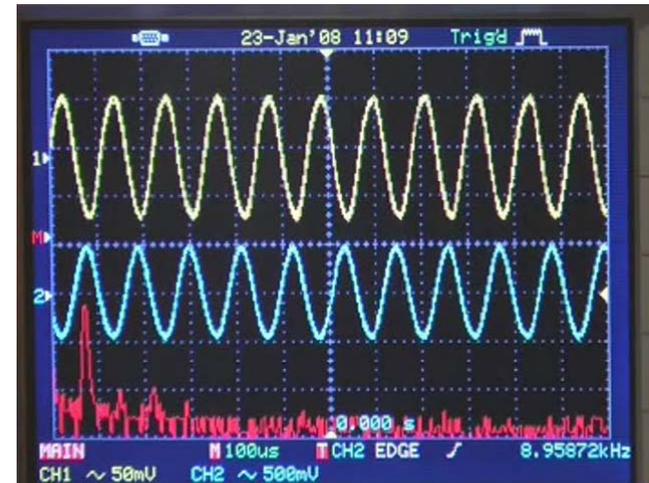
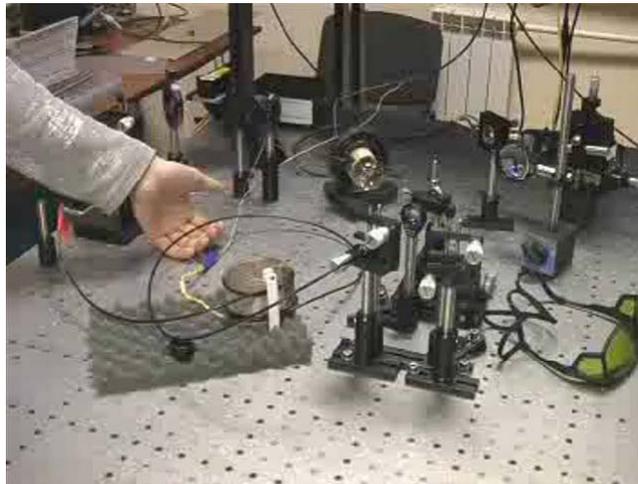
**Есть стабилизация**  
(адаптивный  
интерферометр)



↕ 150 мВ

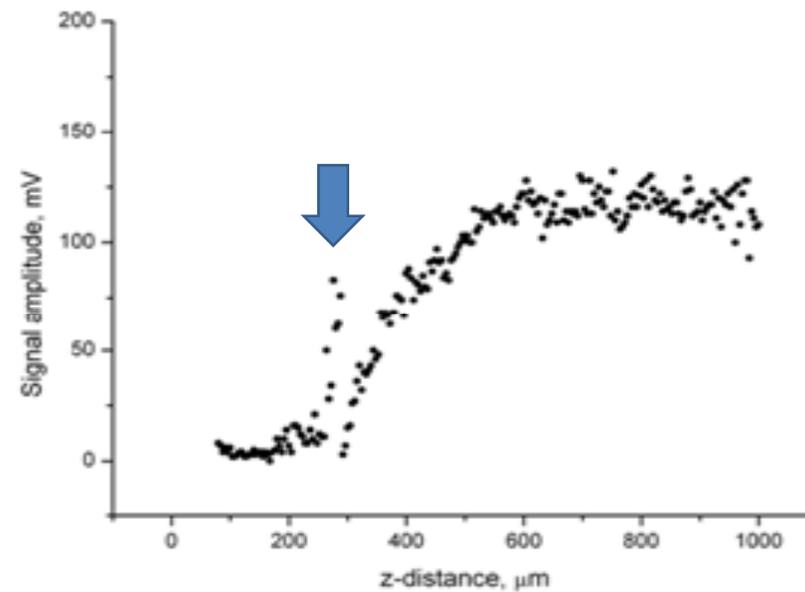
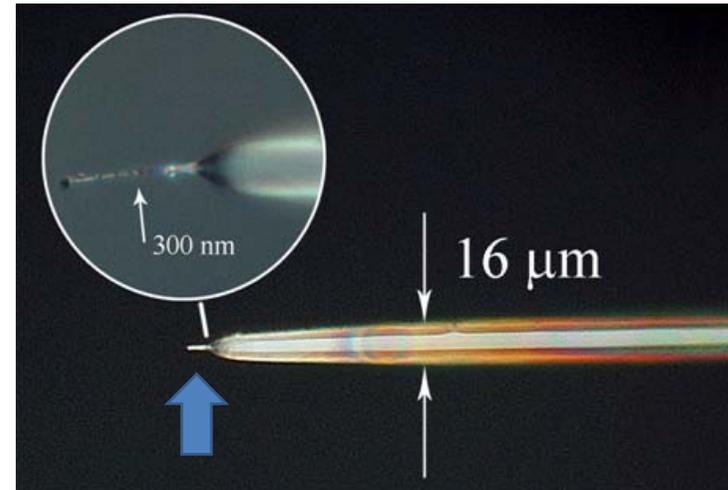
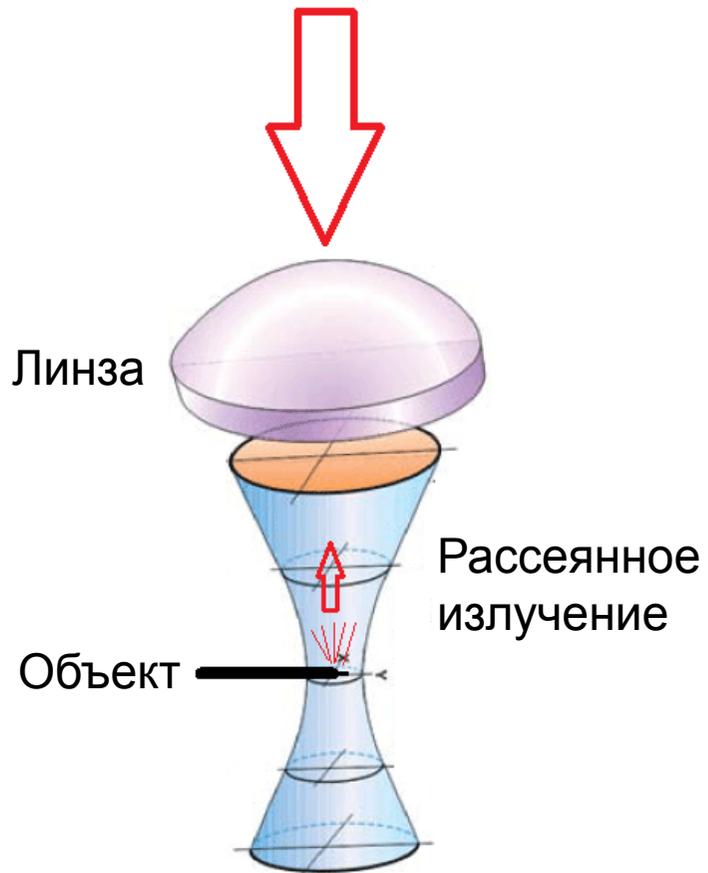
# Работа АИ в условиях сильной механической помехи

Измерения вибраций амплитудой **10 нм (!)**



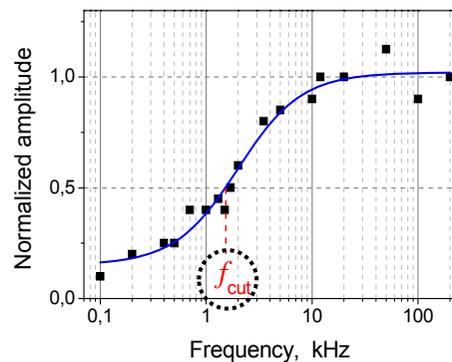
# АИ: мониторинг колебаний микромасштабных объектов

Зондирующий пучок



# Нерешённые проблемы AI (2)

$$f_C = \frac{1}{2\pi\tau_R} \sim I$$



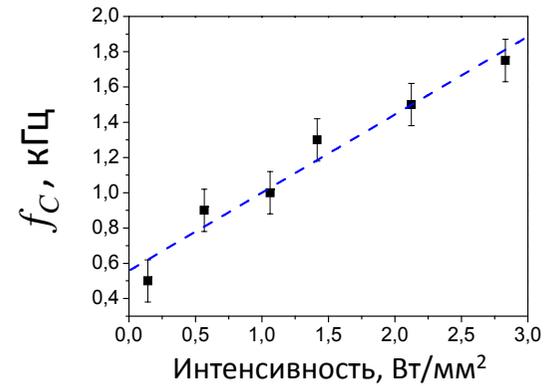
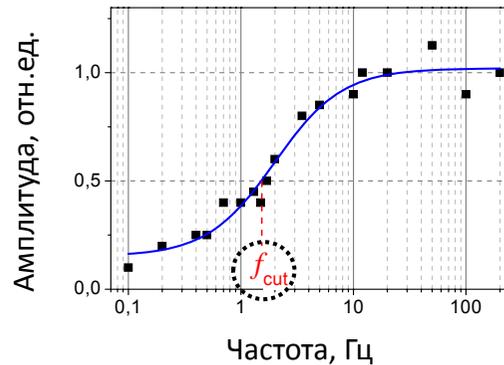
**Высокая интенсивность требуется для**  
повышения быстродействия AI



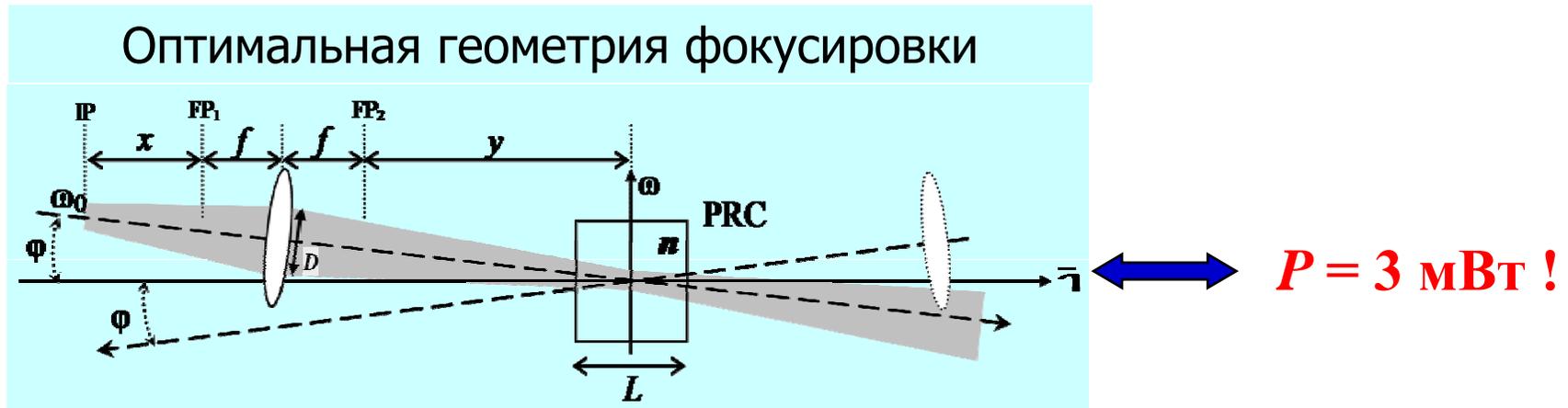
## **Проблемы**

- 1) Высокое энергопотребление
- 2) Непропорциональное удорожание системы

# Оптимальная схема фокусировки световых пучков



Для кристалла CdTe:  $f_c = 1$  кГц @  $I = 1$  Вт/мм<sup>2</sup>  $\longrightarrow$   $P = 500$  мВт

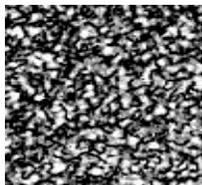


# Нерешённые проблемы АИ (3)

Деполаризованное  
излучение



из МВС



диффузное рассеяние

**Излучение должно быть поляризованным**

для выполнения условий оптимального  
взаимодействия волн в ФРК



**Поляризационная фильтрация**

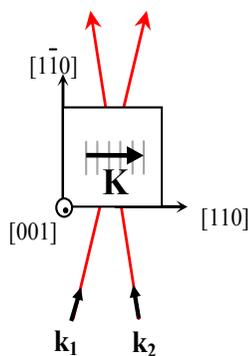


**Проблемы**

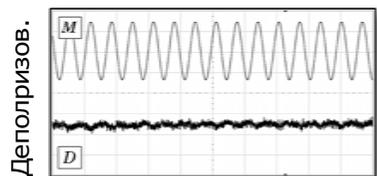
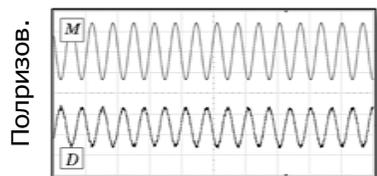
- 1) Значительные потери
- 2) Ослабление чувствительности
- 3) Появление поляризационного шума

# AI на основе ортогональных динамических голограмм

Пропускающая геометрия

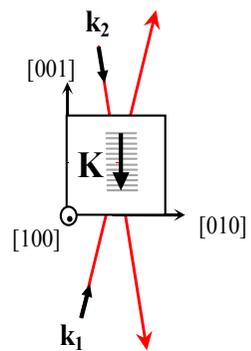


(а)

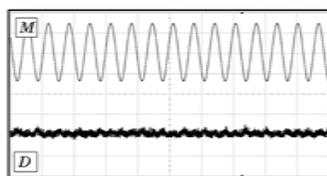
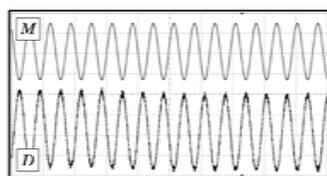


(а)

Отражательная геометрия

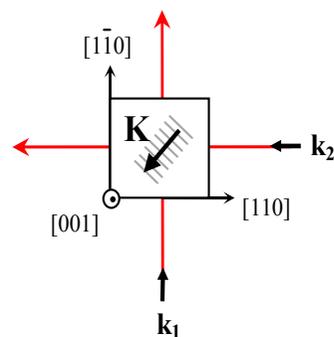


(б)

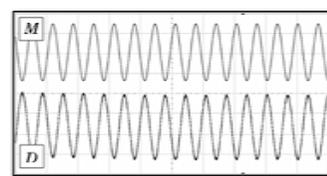
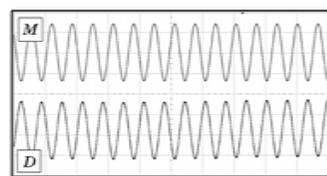


(б)

Ортогональная геометрия

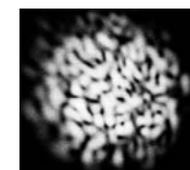


(в)

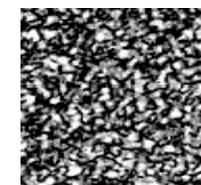


(в)

Деполаризованное  
излучение



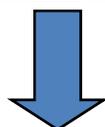
из МВС



диффузное рассеяние

# Многоканальные адаптивные измерительные системы

В ряде практических приложений требуется обеспечить одновременное измерение нескольких параметров



Необходимо одновременно обрабатывать несколько сигналов



Использование  
нескольких ФРК

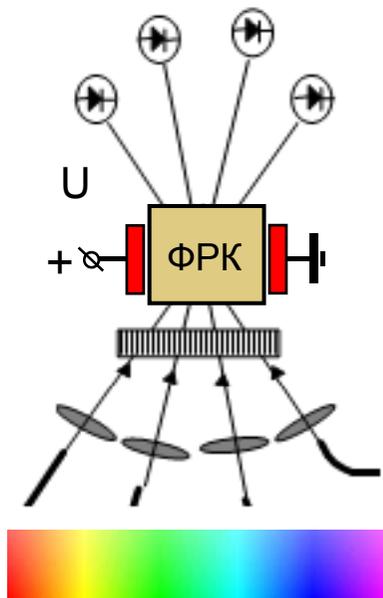
- Технически сложно
- Энергозатратно
- Дорого

Мультиплексирование в  
одном ФРК

- Перекрестные шумы
- Ослабление чувствительности в канале

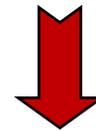
# Нерешённые проблемы АИ (4)

## Многоканальные системы



## Сильное электрическое поле и/или методы спектрального мультиплексирования используются для:

- 1) разделения каналов
- 2) подавления перекрестных шумов



## Технические проблемы

- 1) Перегрев кристалла (вплоть до разрушения)
- 2) Экранирование постоянного электрического поля
- 3) Повышенное энергопотребление
- 4) Усложнение / удорожание системы

# Мультиплексирование отражательных динамических голограмм

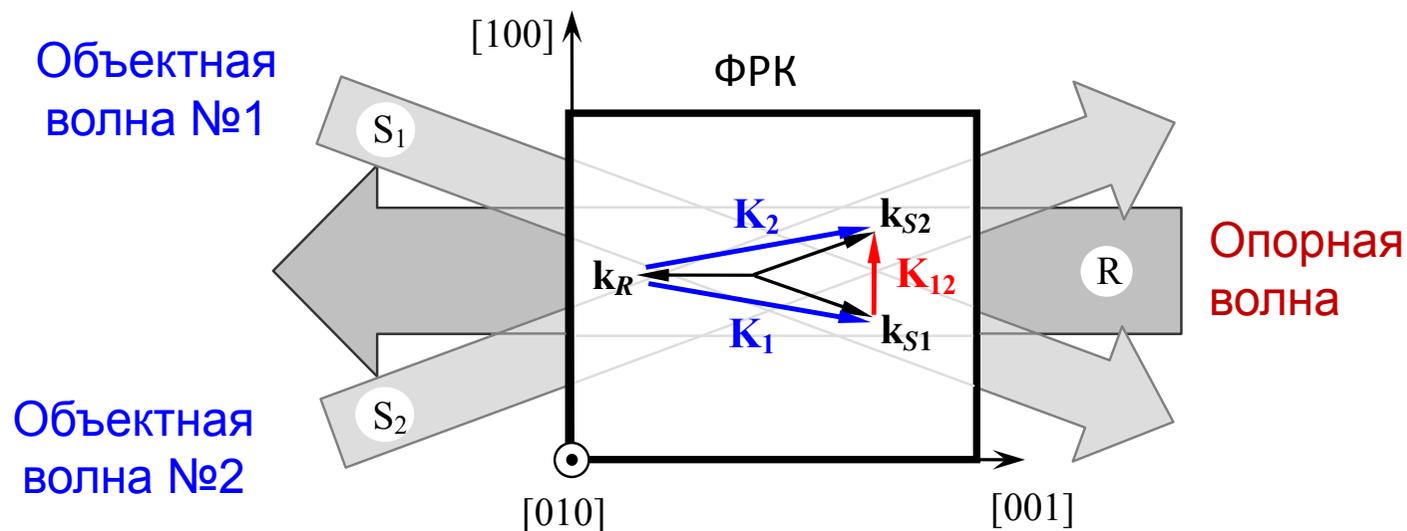


Рис.30. Геометрия мультиплексирования отражательных голограмм

Уравнения связанных волн:

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial z} \vec{A} = \kappa \hat{\mathbf{H}} \vec{B} \\ \pm \frac{\partial}{\partial z} \vec{B} = -\kappa \hat{\mathbf{H}} \vec{A} \end{cases} \quad \text{Матрица связи:} \quad \hat{\mathbf{H}} = \begin{pmatrix} H_{SS} & H_{SP} \\ H_{PS} & H_{PP} \end{pmatrix}$$

Опорная – Объектная:  $\hat{\mathbf{H}} = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$

Объектная – Объектная:  $\hat{\mathbf{H}} = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$

**НЕТ перекрестного шума !**

# Перекрестные шумы

Уровень перекрестного шума

$$N_{cross} \approx 20 \lg(h|\sin \phi|/2)$$

$\phi$  – угол между  $K_{12}$  и осью [100]

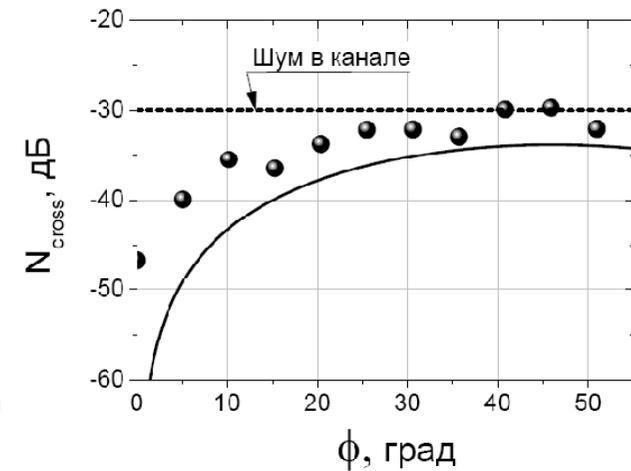
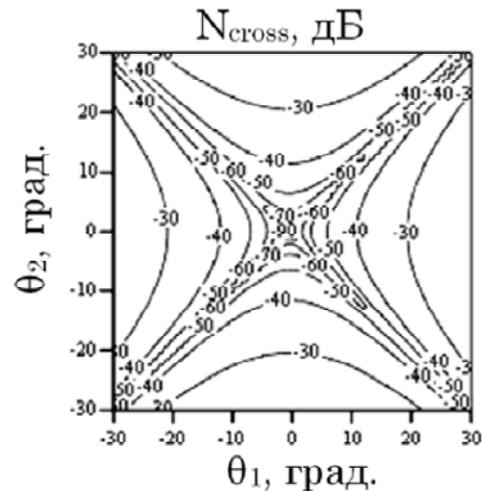
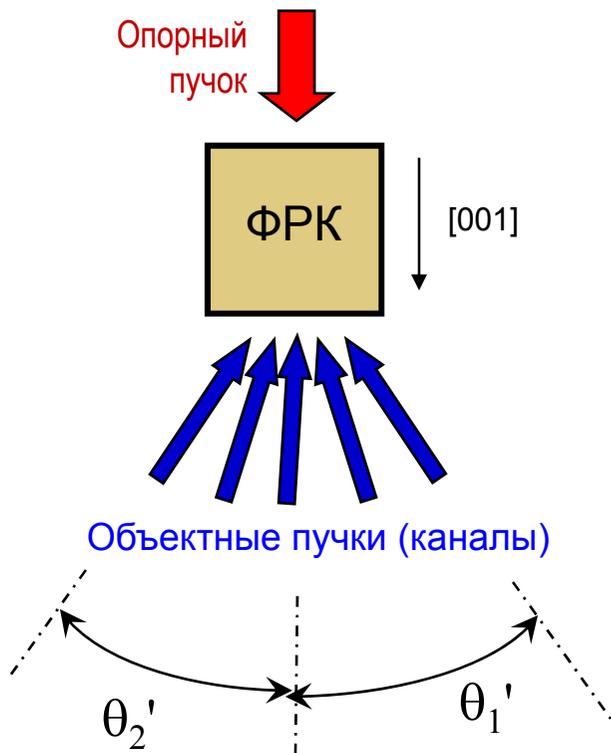


Рис.31. Зависимость уровня перекрестного шума между двумя каналами, сформированными на мультиплексируемых в кристалле CdTe отражательных фоторефрактивных голограммах, от ориентации углов, задающих направление распространения объектных волн

CdTe ( $n = 2,85$ )

Углы падения  $\theta_1'$  и  $\theta_2'$  до :  $\sim 90^\circ$

# Чувствительность на канал

Коэффициент связи волн

$$\kappa \sim \frac{2(I_R I_S)^{1/2}}{I_R + I_S + \sum_i I_i h_i}$$

$h_i$  – степень перекрытия пучков

$$h_i = [0;1]$$

Предел мультиплексирования

$$M^{\max} = \frac{\Delta\delta^{\max}}{\Delta\delta} + 1$$

$$\Delta\delta^{\max} = \delta_{\text{rel}}(M^{\max}) - \delta_1$$

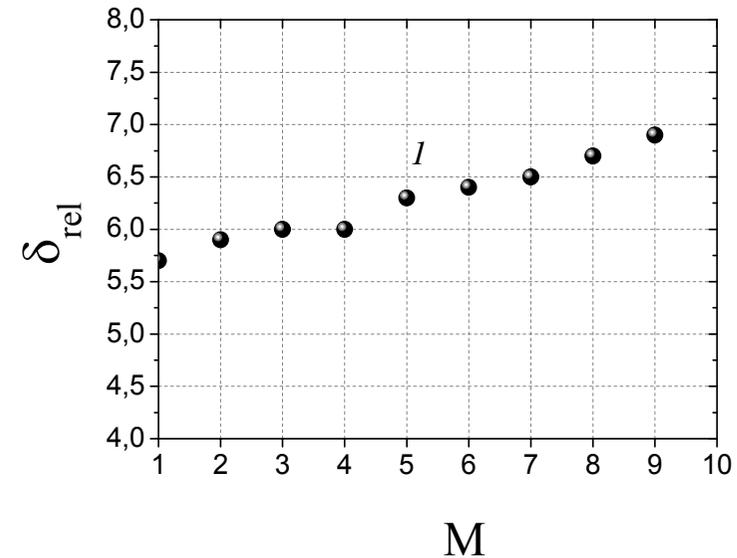


Рис.32. Зависимость относительного порога детектирования от количества каналов

$$\left. \begin{array}{l} \delta_{\text{rel}}(M) = 10\delta_1 \\ \delta_1 \approx 5,7 \end{array} \right\} \rightarrow M^{\max} = 343$$

# Многоканальный адаптивный интерферометр

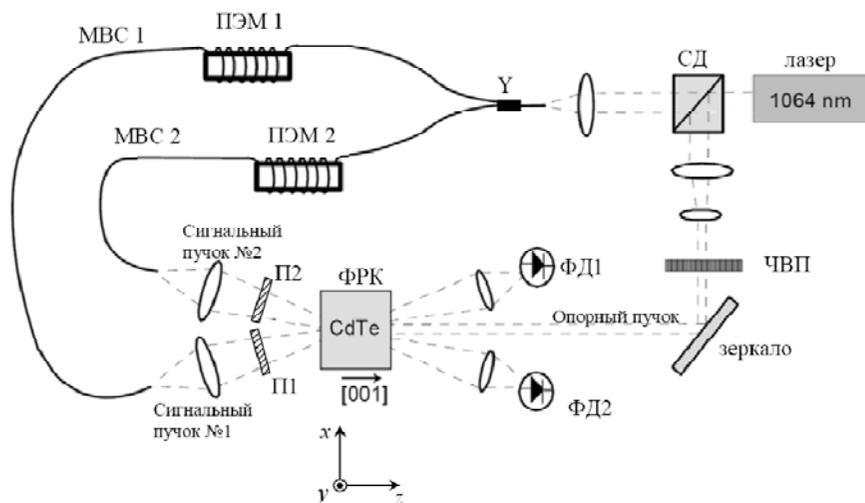


Схема 2-х канального адаптивного волоконно-оптического интерферометра на основе мультиплексирования отражательных голограмм

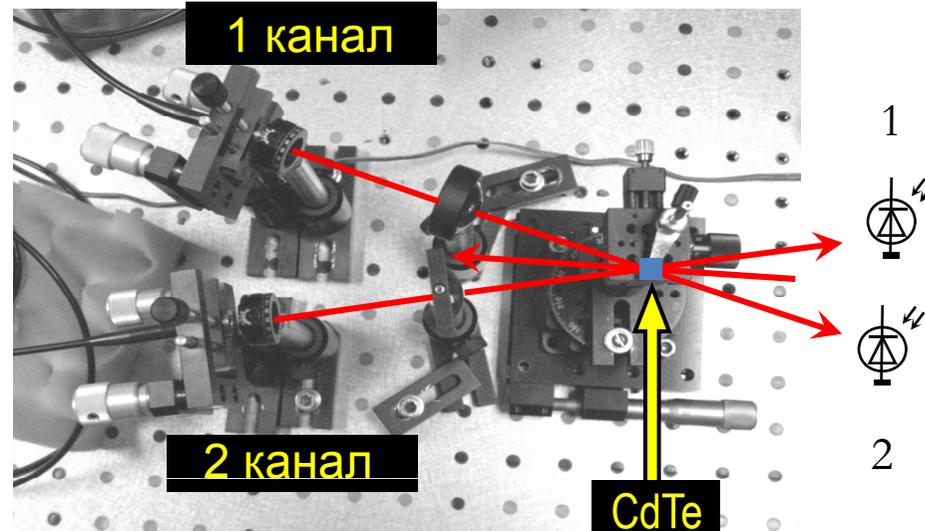
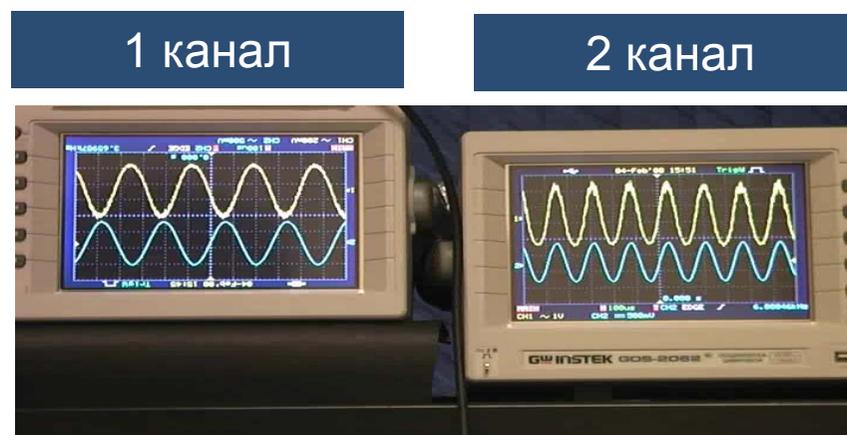


Фото фрагмента 2-х канального АВОИ



Работа 2-х канального АИ

# 6-канальный АИ на основе ортогональных голограмм

$$\delta_{rel} = (17,1 \pm 1,1) / \text{канал}$$

$$\varphi_A^{теор} = 2,6 \times 10^{-8} \text{ рад } \sqrt{(Вт / Гц)}$$

$$\varphi_A^{практ} = 9,0 \times 10^{-8} \text{ рад } \sqrt{(Вт / Гц)}$$

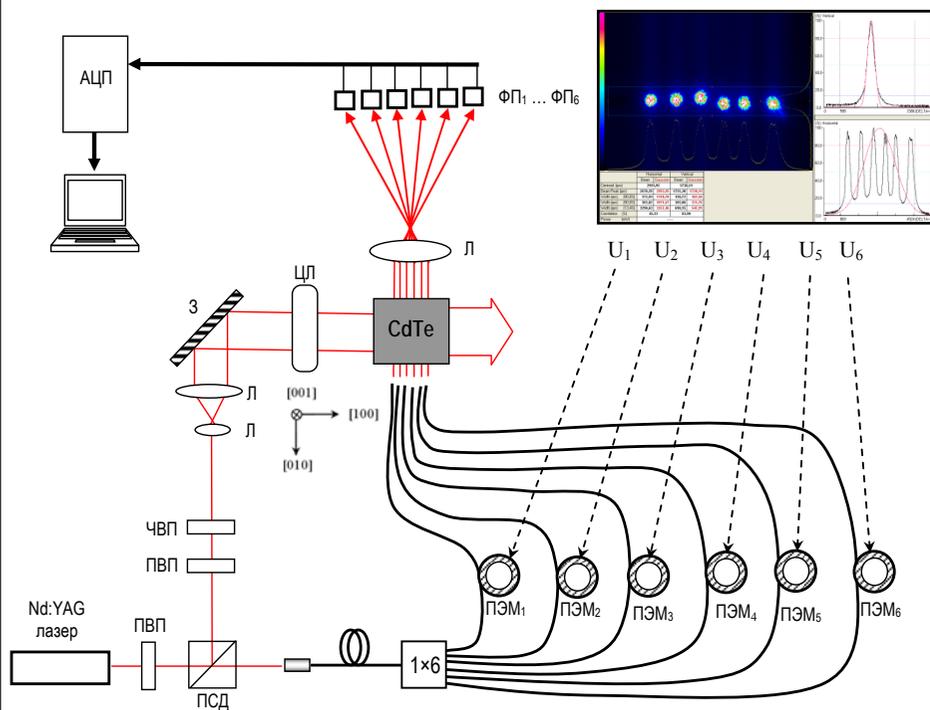
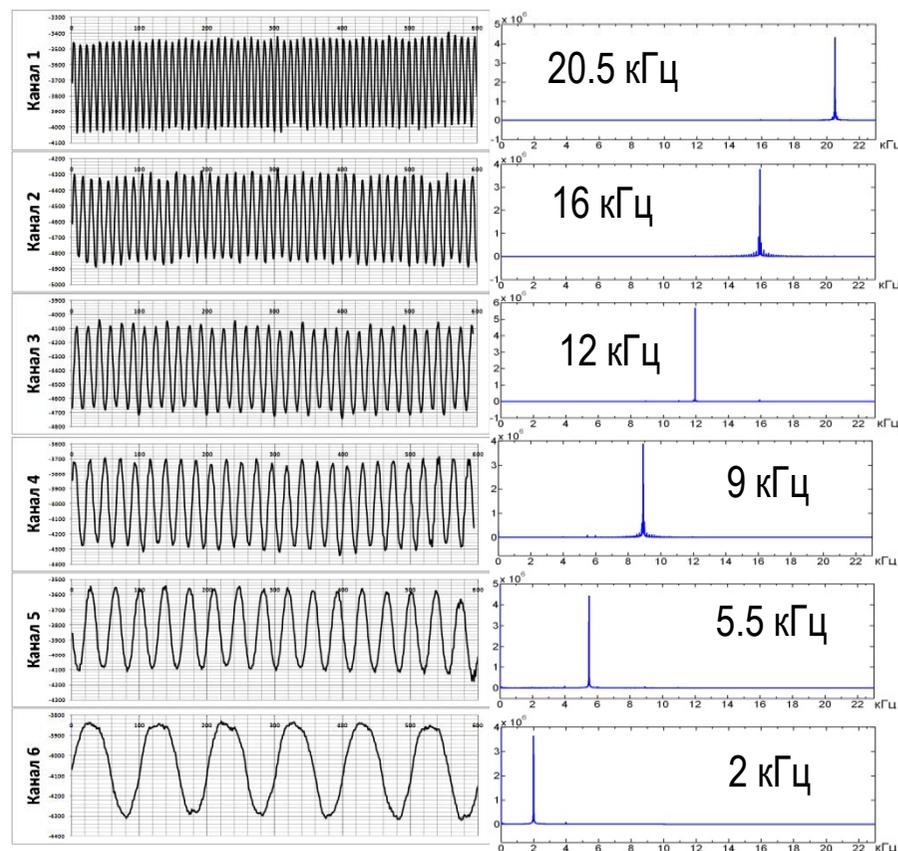


Схема 6-ти канального АВОИ на основе мультиплексирования ортогональных динамических голограмм



(а)

(б)

Осциллограммы сигналов (а) и их Фурье-спектры (б) в 6-ти канальном АВОИ

## 2-х каналный АИ: детектирование УЗ импульсов

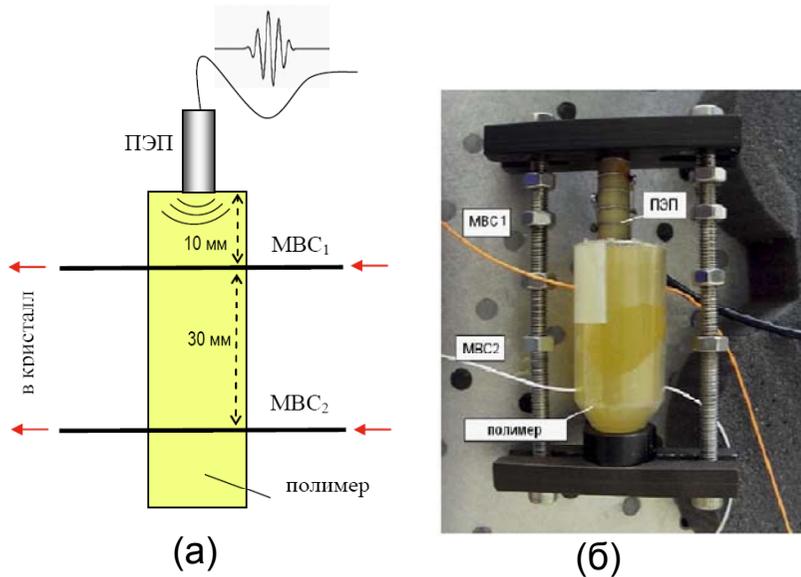


Рис.39. Схема (а) и фотография (б) исследуемого объекта с размещенными в нём волоконно-оптическими сенсорами

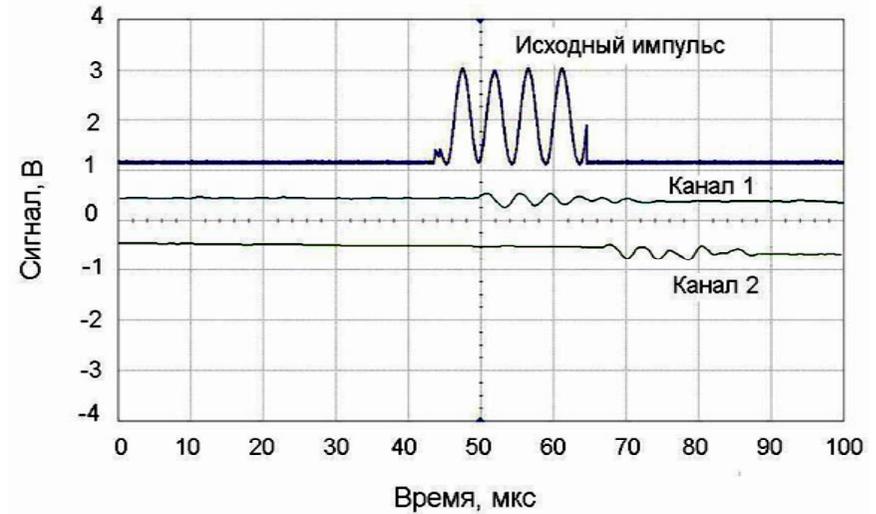
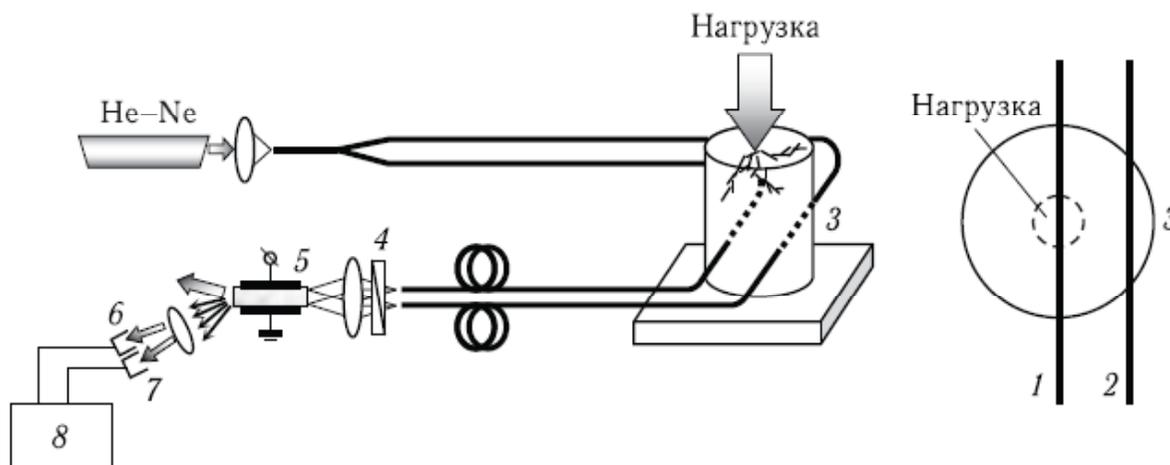


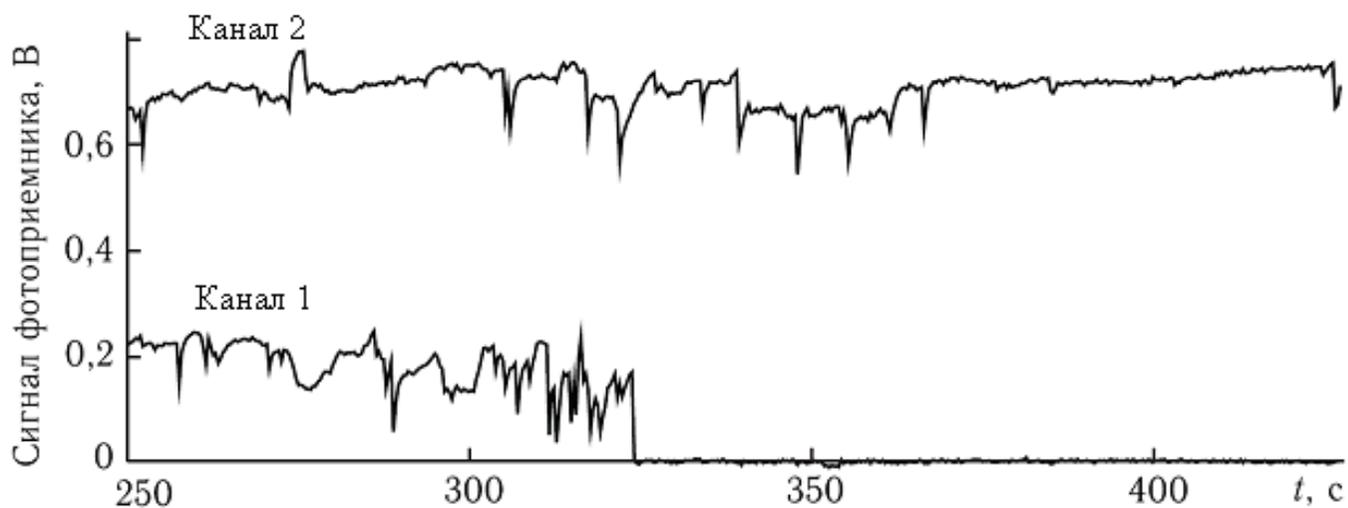
Рис.40. Осциллограммы возбуждающего импульса и сигналов, детектируемых в двух каналах адаптивного интерферометра

$$d = 30 \text{ мм}$$
$$t = 18 \text{ мкс}$$
$$v = 1670 \text{ м/с}$$

## 2-х канальный АИ: мониторинг образования трещин



Двухканальная адаптивная волоконно-оптическая корреляционная ИС для мониторинга процессов деформации и разрушения твердых тел



Осциллограммы сигналов в 1-ом и 2-ом каналах двухканальной АВОИС

## Заключение

Таким образом, получены результаты работы, которые закладывают фундамент в создании АИС нового поколения, отличительными характеристикам которых являются:

1. Высокая чувствительность.
2. Высокое быстродействие / адаптивность.
  - возможность работы во внелабораторных условиях.
3. Низкое энергопотребление / автономность:
  - работа без использования каких-либо внешних электрических полей;
  - работа с использованием маломощных источников оптического излучения
4. Поляризационная независимость:
  - возможность использования деполаризованного излучения;
  - возможность использования излучения с произвольным типом поляризации.
5. Многоканальность:
  - практическое отсутствие перекрестных помех
  - высокая чувствительность на канал.

Благодарю за внимание!