

**Лазер с узкой линией для
спектроскопии "часового" перехода
одионочного
иона Yb^+**

А.А. Луговой

Н.Л.Квашнин, С.В.Чепуров, С.Н. Багаев, [М.В. Охапкин](#)

ИЛФ СО РАН

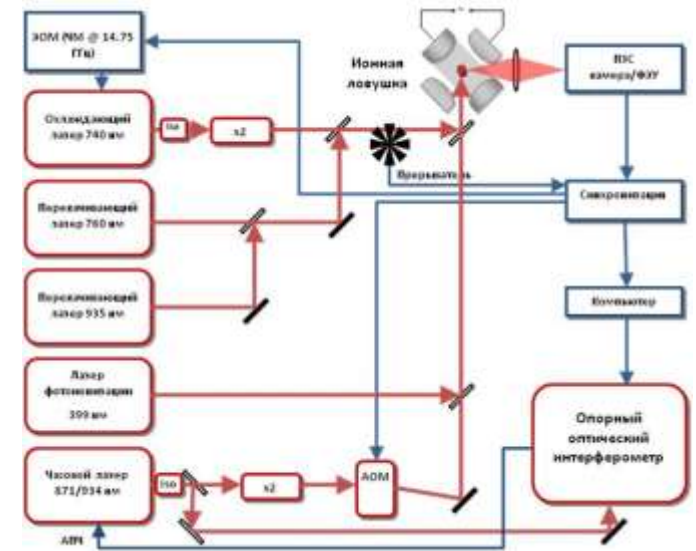
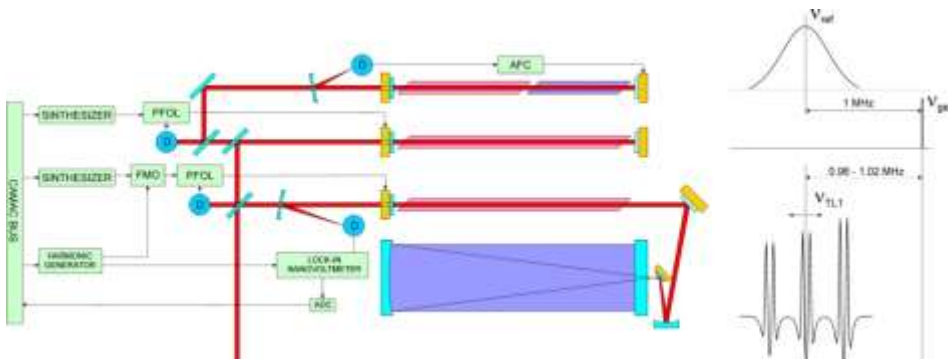
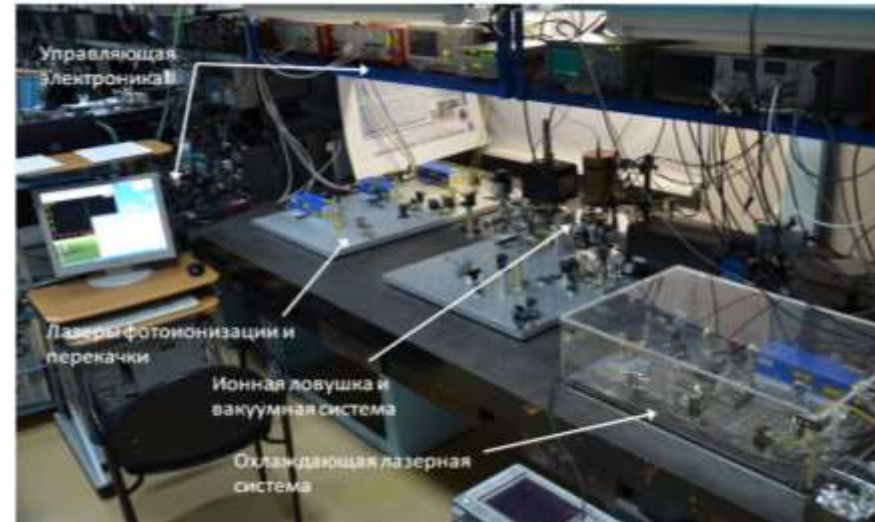
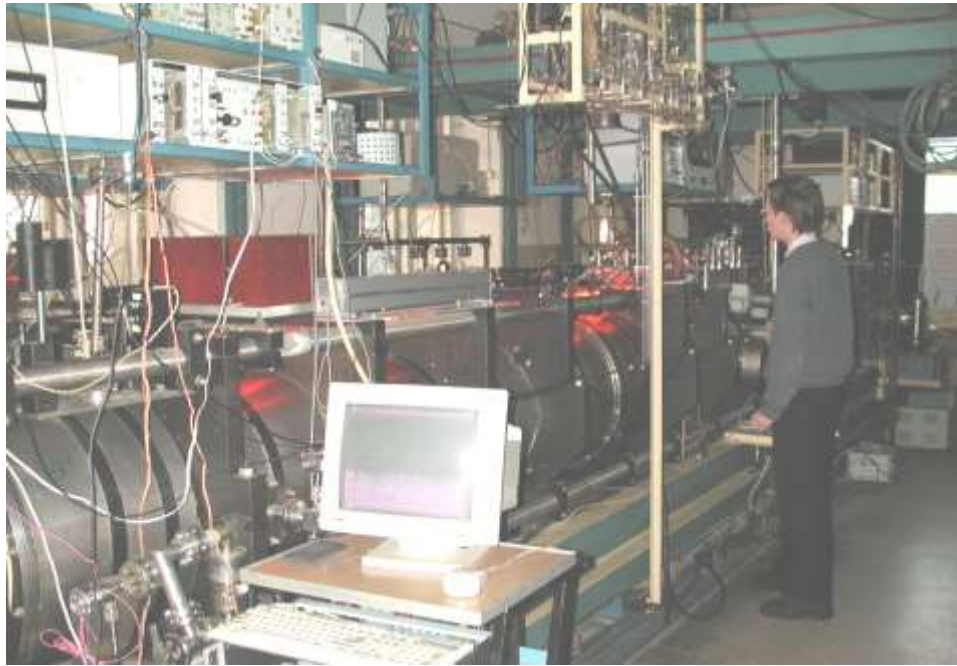
Физика ультрахолодных атомов, 18 декабря 2017 года

Прогресс в развитии стандартов

He-Ne/CH₄ ($\Delta\nu \sim 1E-14$)

ЧАСТОТЫ

Yb⁺ ($\Delta\nu \sim 1E-17$)



Современный стандарт частоты

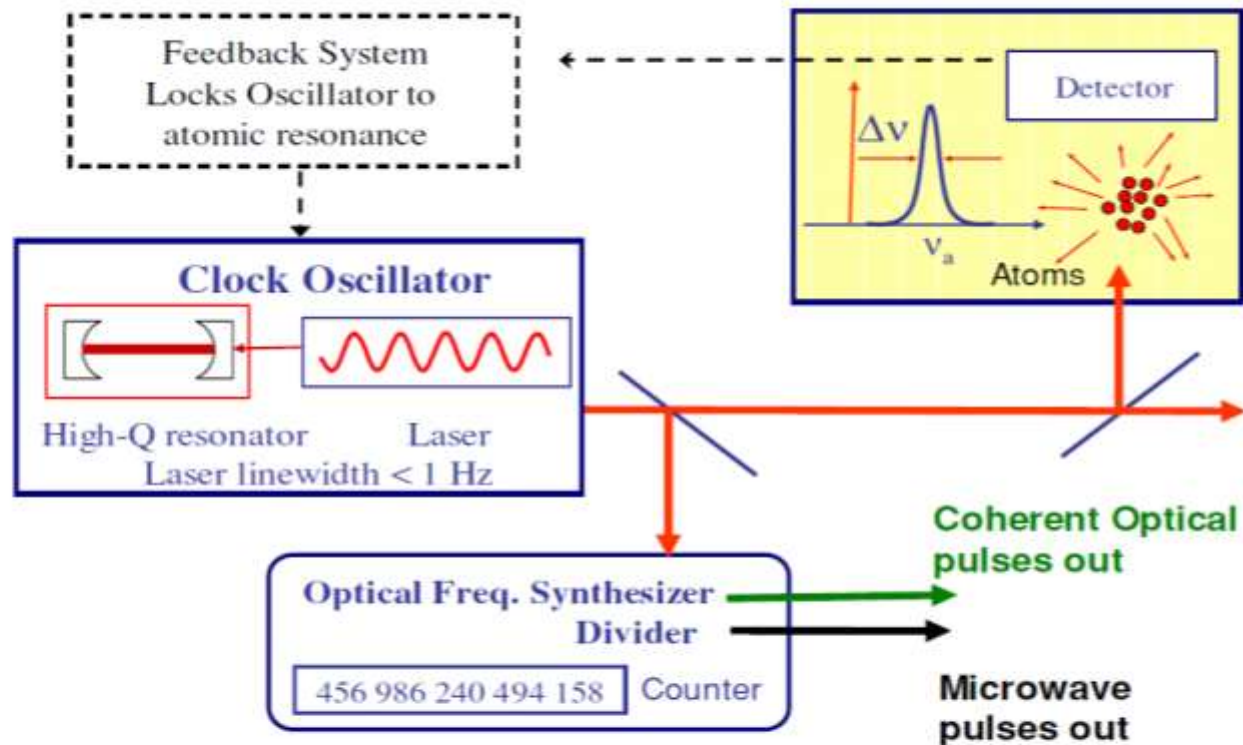


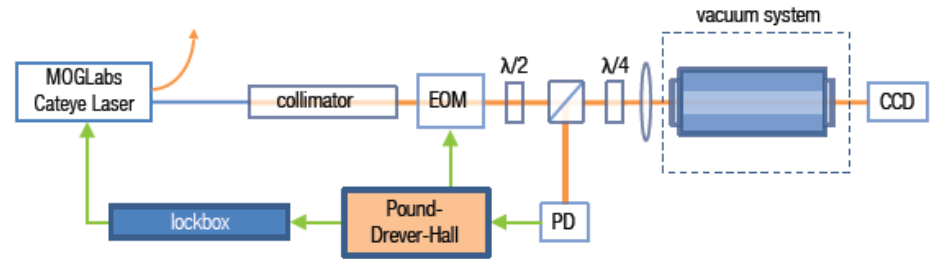
Figure 1. Schematic diagram of a modern optical frequency reference based on a spectrally sharp atomic resonance. The atomic resonance is probed by a narrow linewidth laser that is pre-stabilized to a high- Q Fabry–Perot cavity. On longer times scales the feedback control system steers the laser frequency to the atomic resonance. By adding the totalizing optical frequency counter/divider shown at the bottom of the figure, the optical frequency reference becomes an optical atomic clock.

Коммерчески доступная система

ORS-DL

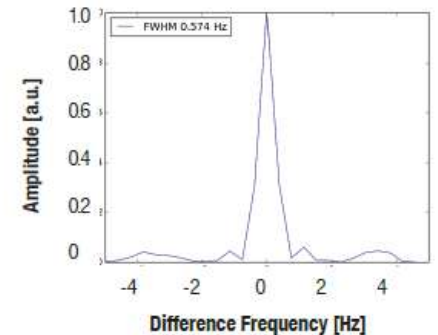
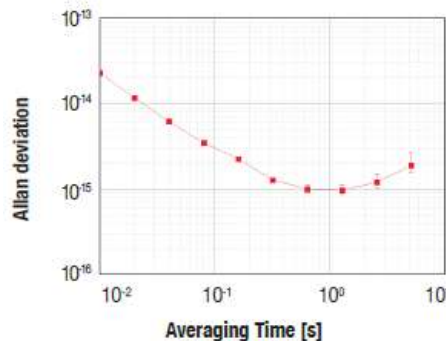
Optical Reference System

MenloSystems



STABILITY AND LINewidth

Beat of 698 nm ORS-DL against Ultralow Noise Optical Frequency Comb locked to 1542 nm ORS1500

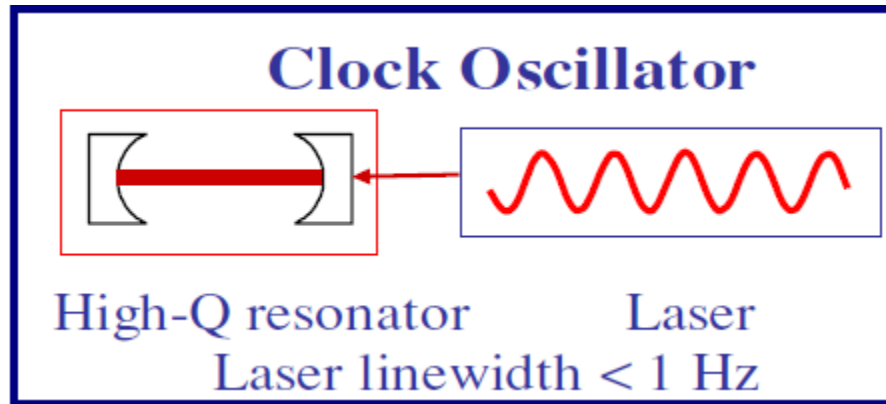


~€180000

- linear drift removed
- measured with K+K FXE counter

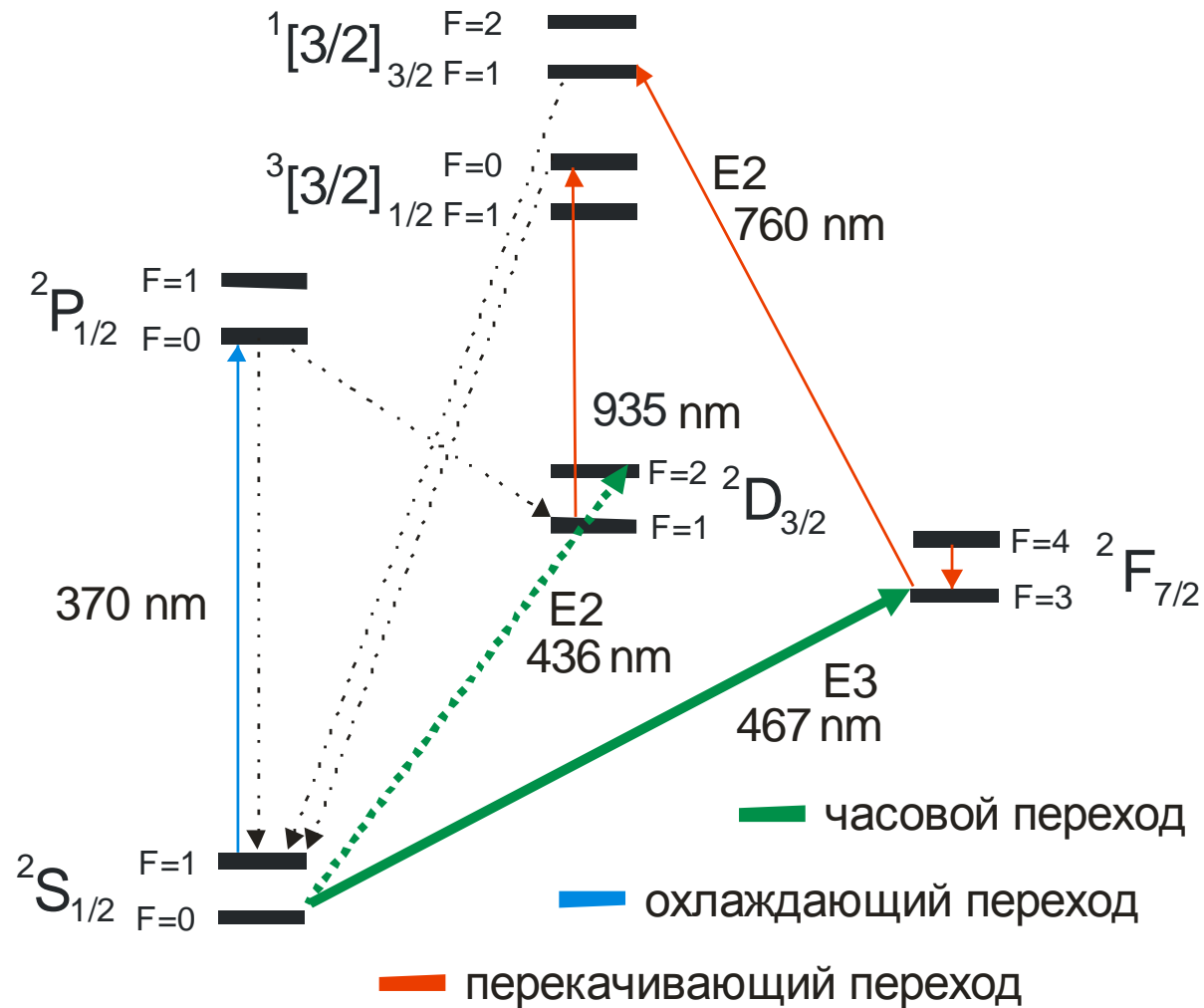
- beat frequency mixed down to 5 kHz, sampled and Fourier transformed
- FWHM linewidth <1Hz

Требования к системе лазер-эталон для использования в качестве «часового» лазера

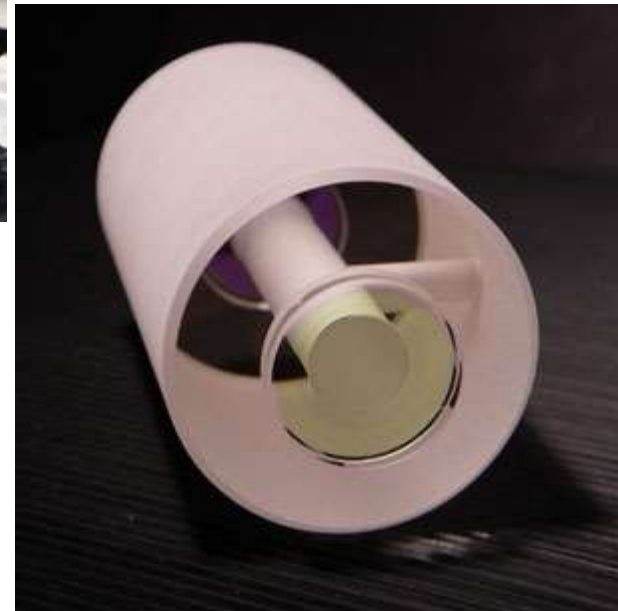


- Размещение эталона в вакууме ($P < 1E-6$ Torr)
- Изоляция эталона от внешних акустических возмущений и вибраций
- Система термостабилизации эталона с точностью < 1 мК
- Активное подавление частотных шумов лазера до требуемого уровня с помощью системы АПЧ
- Прецизионный контроль параметров лазера, уровня паразитной амплитудной модуляции и паразитных сигналов из-за рассеяния и отражения на оптических элементах

Схема энергетических уровней Yb^+

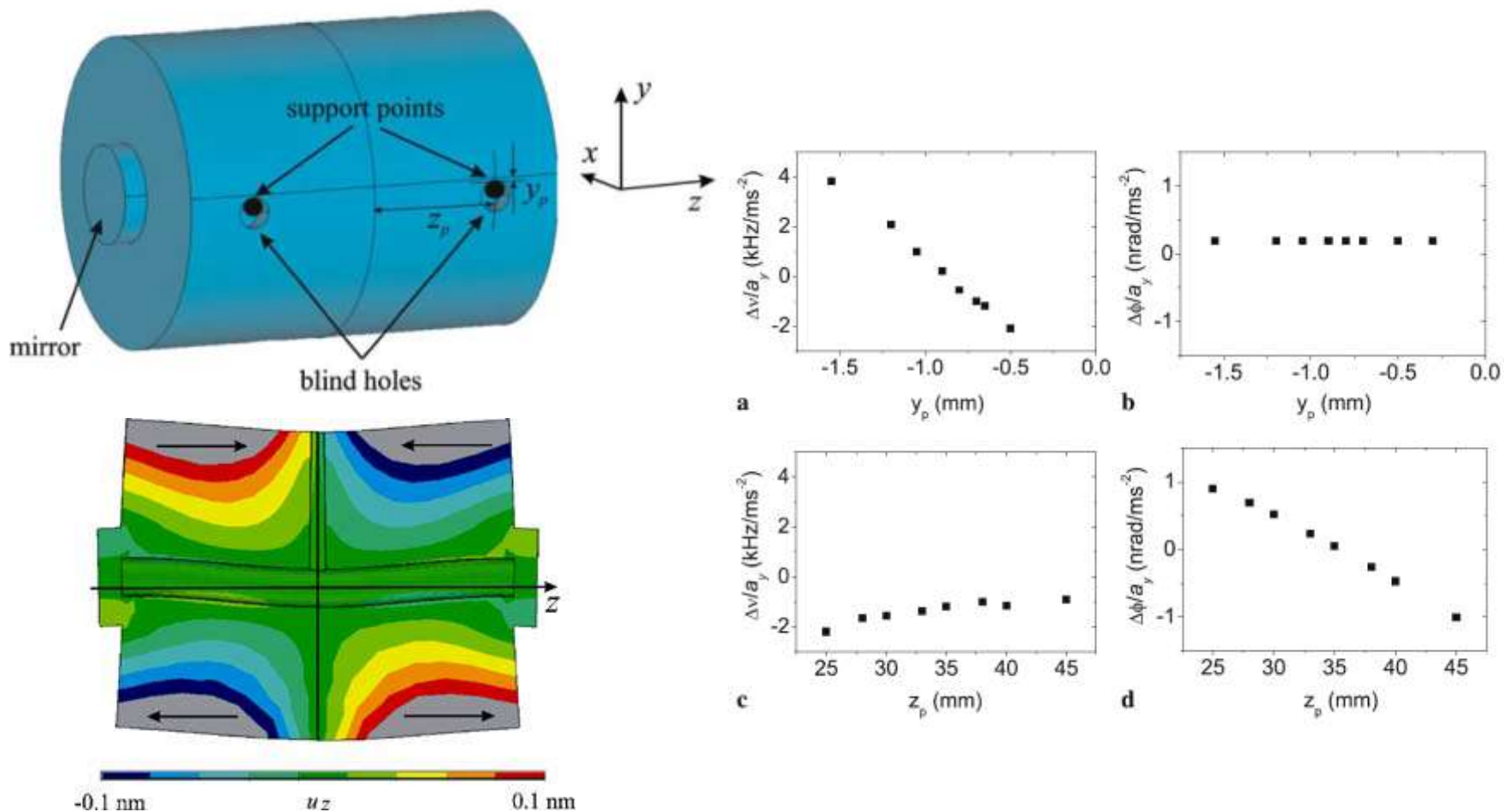


Конфигурация, тип установки эталона



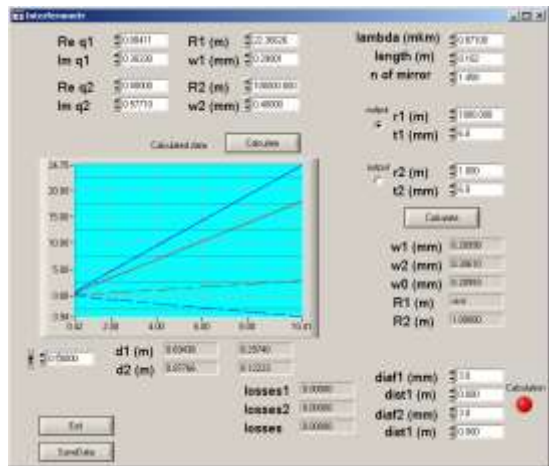
Выбранная конфигурация

T. Nazarova, F. Riehle, U. Sterr, "Vibration-insensitive reference cavity for an ultra-narrow-linewidth laser", Appl. Phys. B 83, 531–536 (2006)



Подготовительные работы

Согласование мод

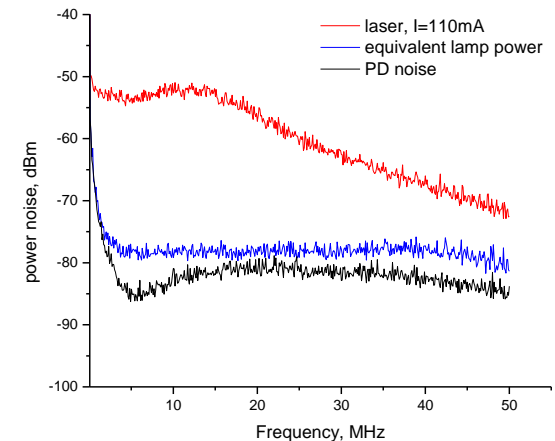


10 MHz proportional gain bandwidth
LOCK-BOX
for diode laser locking
to high finesse Fabry-Perot cavity



€2000

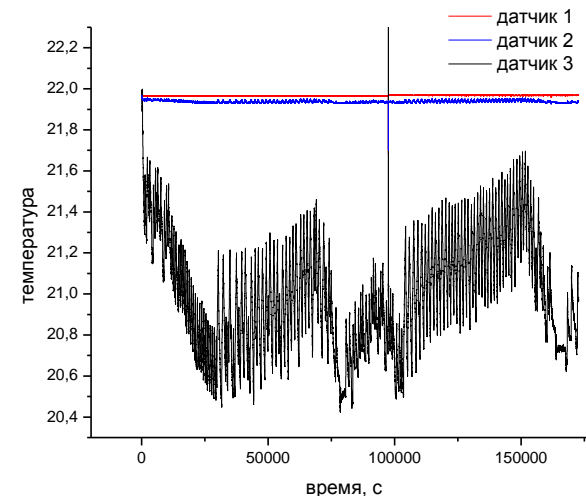
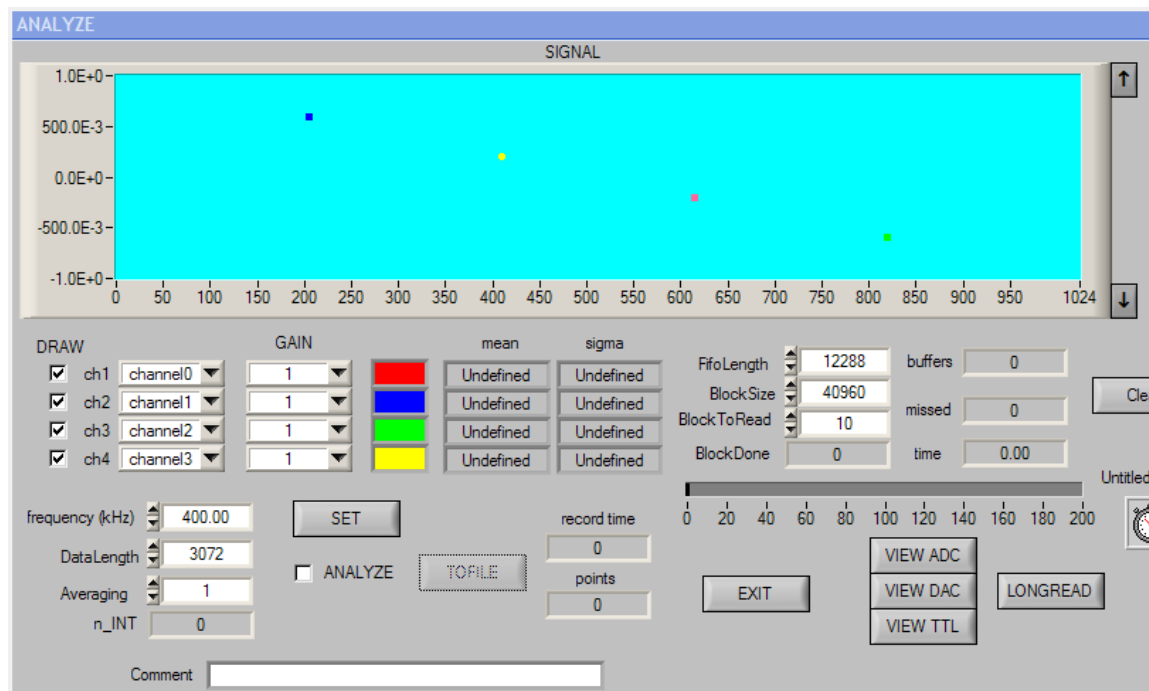
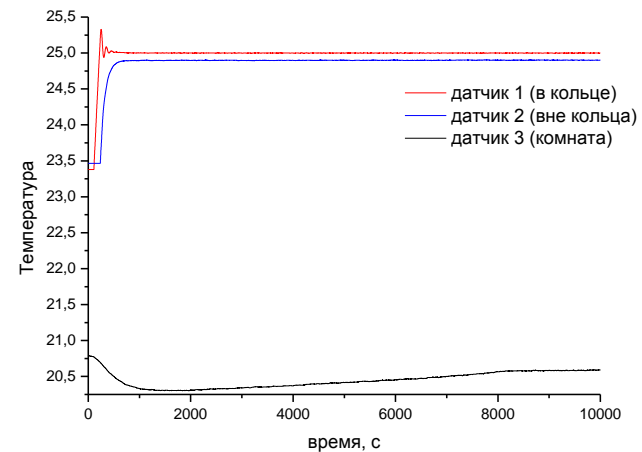
- Термостабилизированный кожух
- Вакуумная камера
- Расчет веса системы (>70 кг)
- Выбор оборудования
- Покупки+изготовление
- Система АПЧ



Система термостабилизации



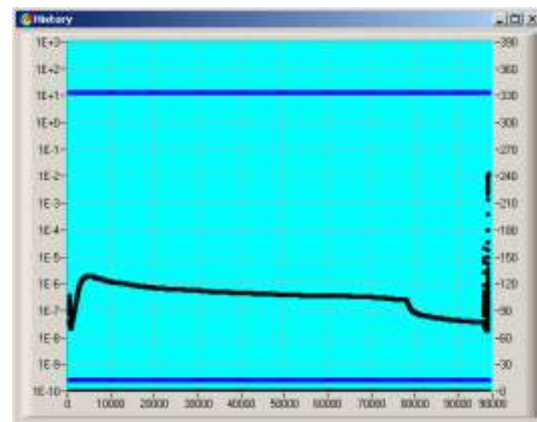
4(8) channel longterm signal analyzer (L-Card E14-440D)



Этапы работы с вакуумом «часового» лазера

- Создание рабочего места в подвале: прогрев, вытяжка (15.01.15-01.04.15)
- Обезгаживание пустой камеры 30.04.15 – 25.05.15 (250°C)
- Изменение схемы нагрева (куплен терморегулятор)
- Обезгаживание деталей 02.07.15 – 11.08.15 (300°C)
- **Измерение скорости нагрева иона в ловушке 08.15-10.15**
- Подготовка датчиков 23.10.15-28.10.15
- Установка датчиков, поиск и устранение течи, обезгаживание датчиков, установка окон (23.10.15-13.11.15)
- Сборка железа без эталона, обезгаживание (90°C) 13.11.15 – 30.11.15
- Установка эталона 03.12.15
- Обезгаживание без прогрева 03.12.15-11.12.15
- Подключение датчиков 11.12.15, обезгаживание до 15.12.15
- Замена прокладок на окнах, попытка установки ионного насоса 15.12.15
- Трещины в окнах (17.12.15), устранение проблемы, поиск торцевой головки ¼", 12граней для насоса (до 21.12.15)
- Установка насоса 21.12.15, отключение от поста и перенос в к.14 24.12.15

Установка эталона (03.12.15)



План работ

Стабилизация частоты лазера:

- Ввод излучения в эталон
- Стабилизация частоты лазера
- Измерение характеристик лазера и эталона
- Улучшение характеристик петель обратной связи

Изоляция эталона от внешних возмущений:

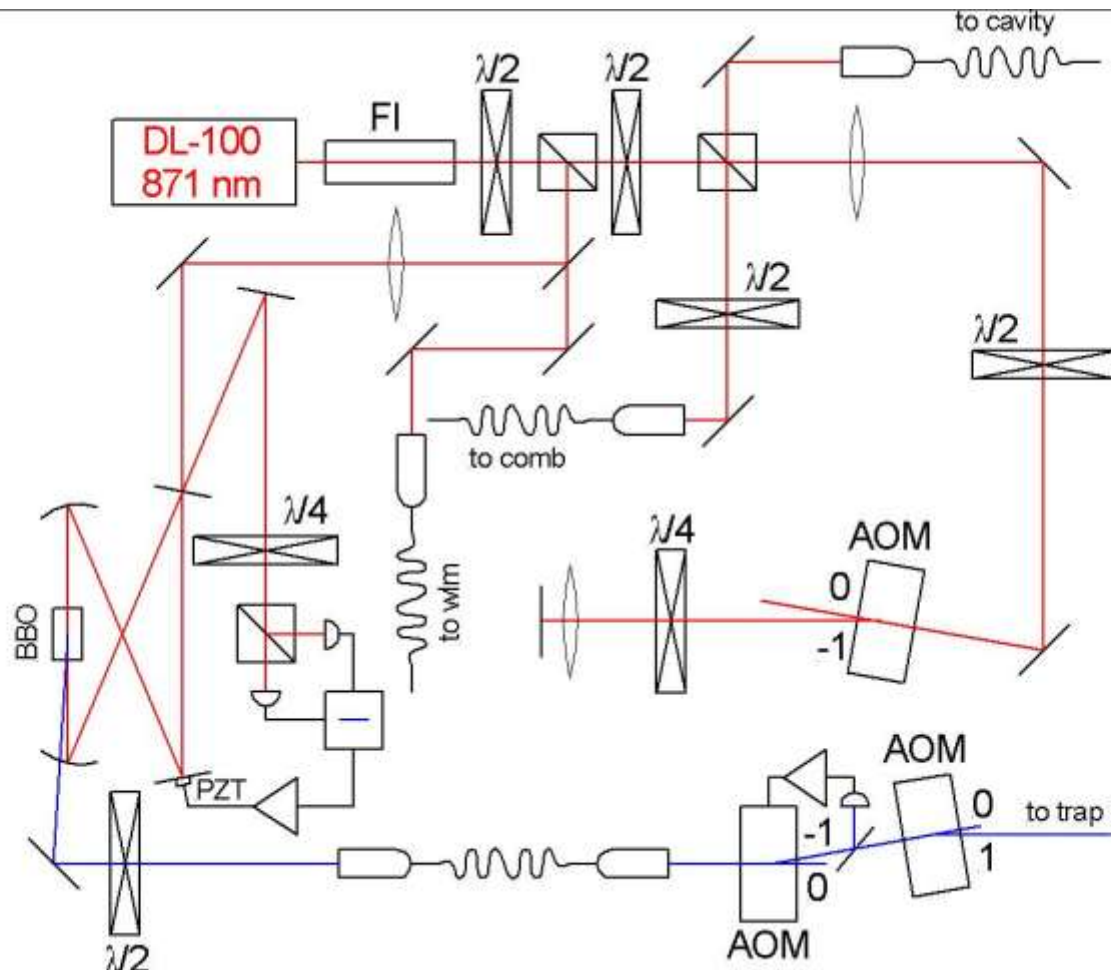
- Термостабилизация эталона
- Стабилизация мощности вводимого излучения
- Поиск температуры нулевого коэффициента теплового расширения
- Изоляция от вибраций и акустических возмущений

Характеризация системы лазер-эталон:

- Измерение дрейфа частоты
- Измерение ширины линии излучения «часового» лазера

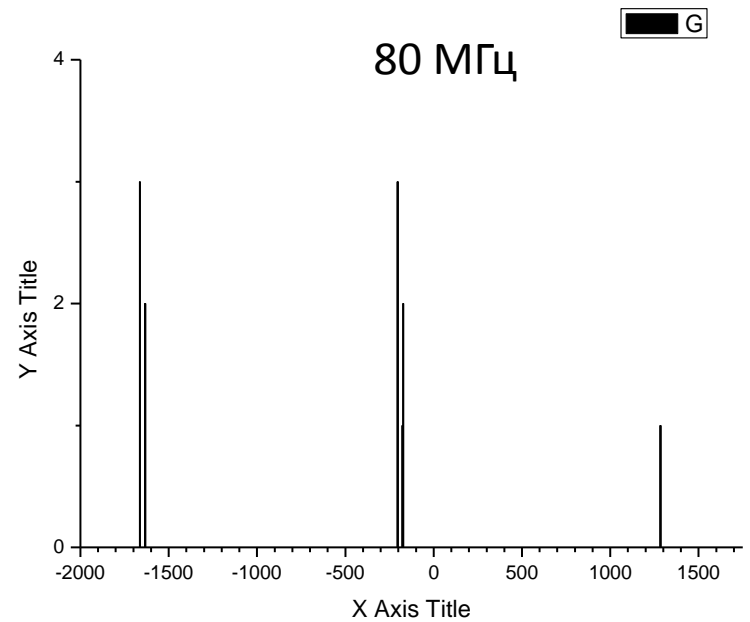
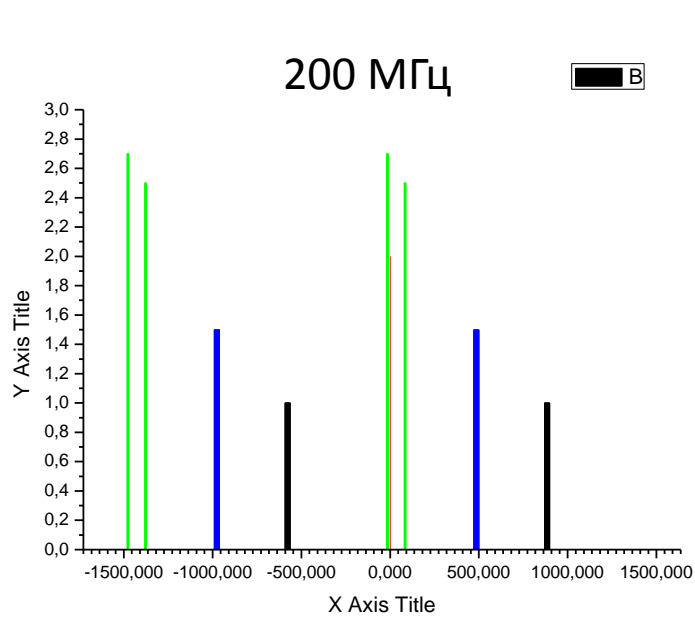
Реализация прецизионного управления частотой лазера, встраивание в цикл охлаждения иона и детектирования его состояния, запись резонанса $\rightarrow \infty$

Оптическая схема (часть 1)



Замена АОМ

$$\nu(\text{Yb}^{171}) - \nu(\text{etalon}) = \pm 2 * \nu(\text{AOM})$$



Стабилизация методом PDH (Pound-Drever-Hall technique)

Drever, R. W. P., Hall, J. L., Kowalski, F. V., Hough, J., Ford, G. M., Munley, A. J. H. Ward (1983). "Laser phase and frequency stabilization using an optical resonator". *Appl Phys B*. **31** (2): 97

Laser Phase and Frequency Stabilization

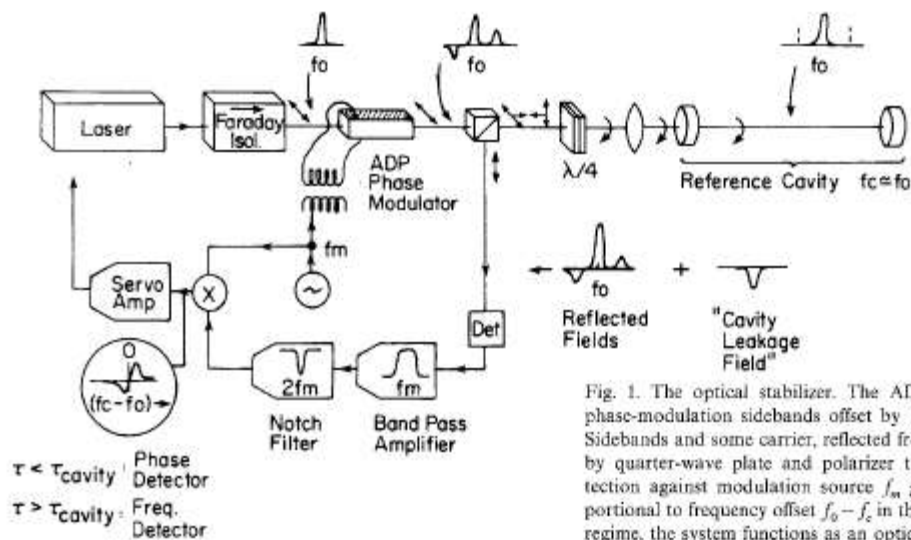


Fig. 1. The optical stabilizer. The ADP phase modulator produces phase-modulation sidebands offset by $\pm f_m$ from carrier frequency f_c . Sidebands and some carrier, reflected from reference cavity, are steered by quarter-wave plate and polarizer to detector. Phase-sensitive detection against modulation source f_m gives bipolar error signal proportional to frequency offset $f_c - f_c$ in the adiabatic regime. In transient regime, the system functions as an optical phase detector (see text)

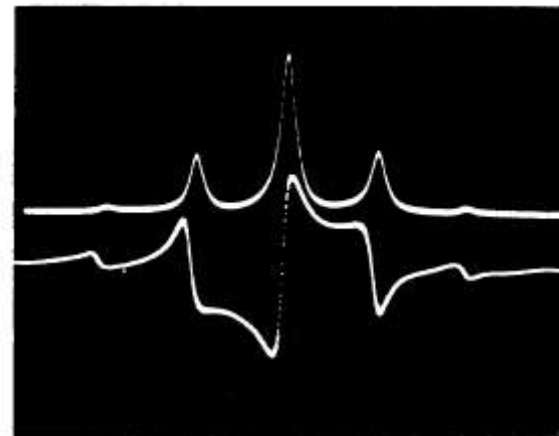
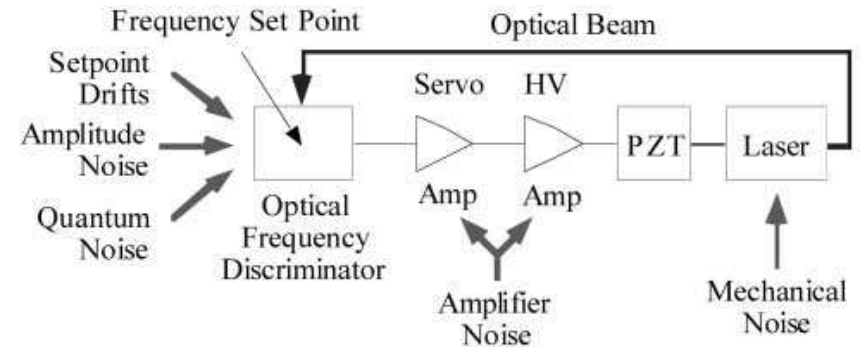
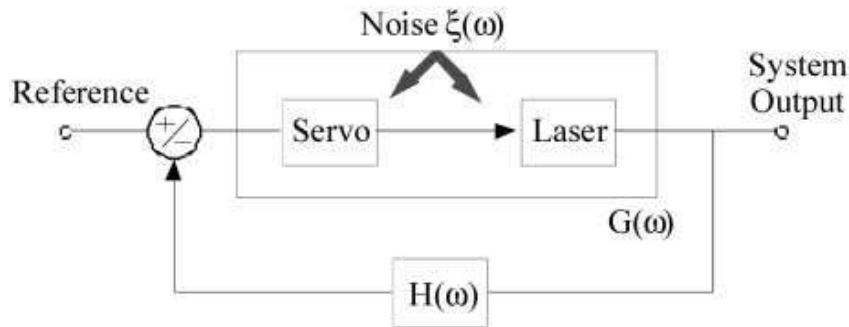


Fig. 2. Signals in the optical stabilizer. Upper curve, transmitted laser intensity as cavity is tuned over sideband structure of phase-modulated laser beam. First and second sidebands visible symmetrically on both sides of the carrier (prominent central line). Lower curve, output of the phase detector with phase reference adjusted for dispersion. Lock point is the zero in the central high-slope region. Note that the error signal sign is correct for servo purposes over the full spectral interval $2f_m$

Система АПЧ (теория)

Для расчета петли обратной связи необходимо знать АЧХ и ФЧХ органов управления



$$H(\omega) = R_i / (R_i + R_f + 1/j\omega C)$$

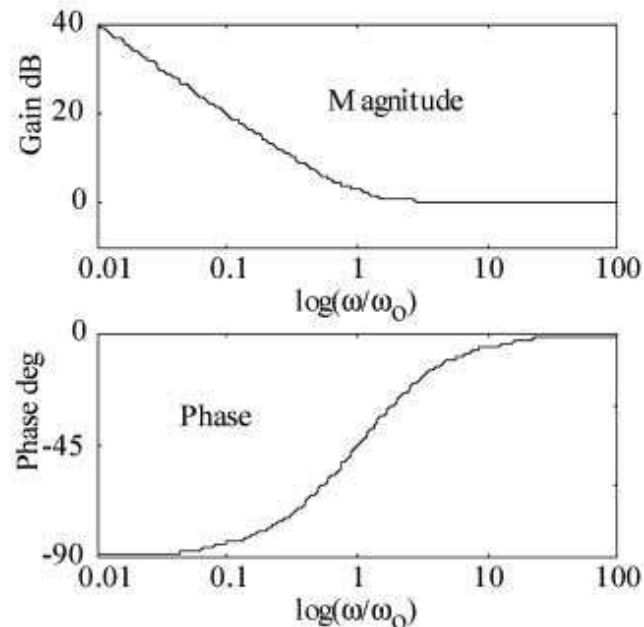
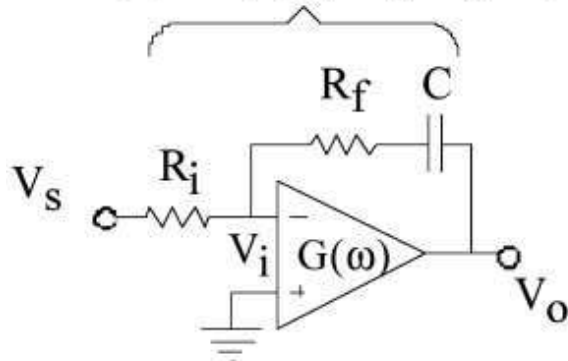
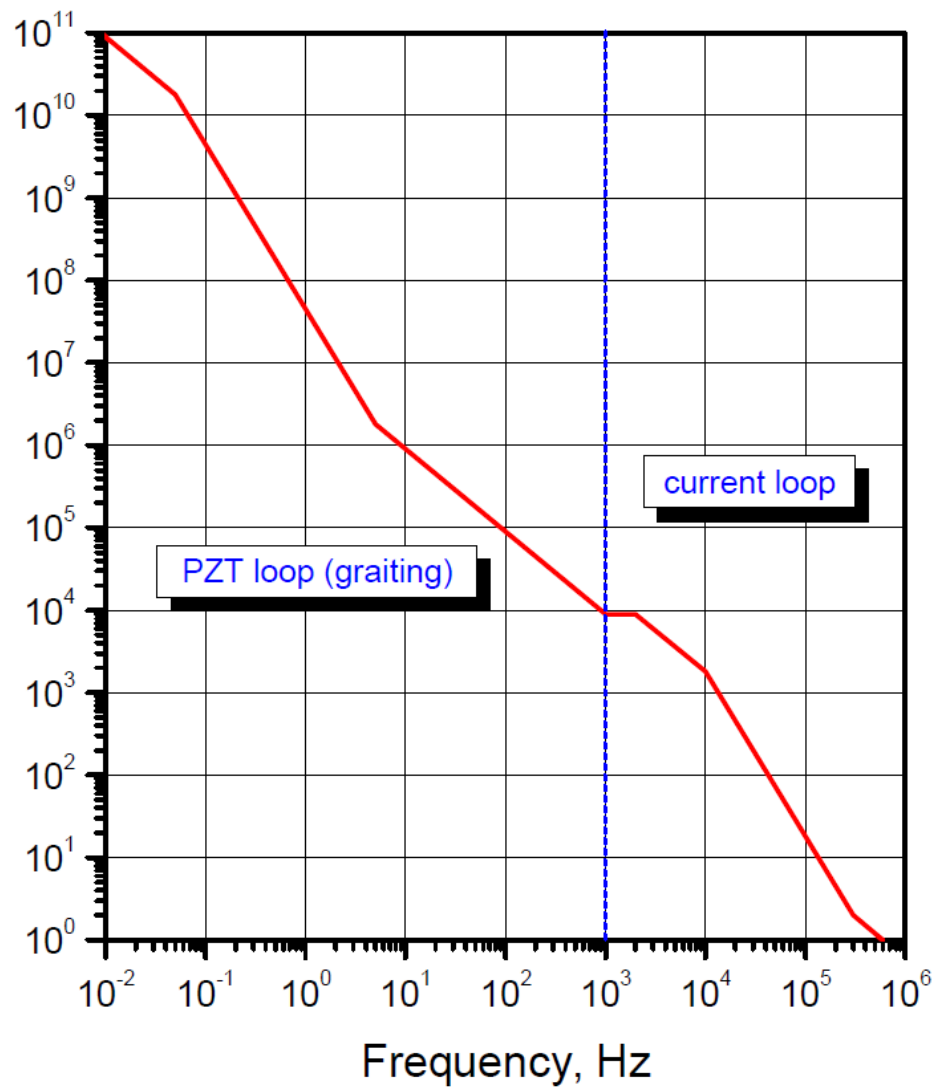
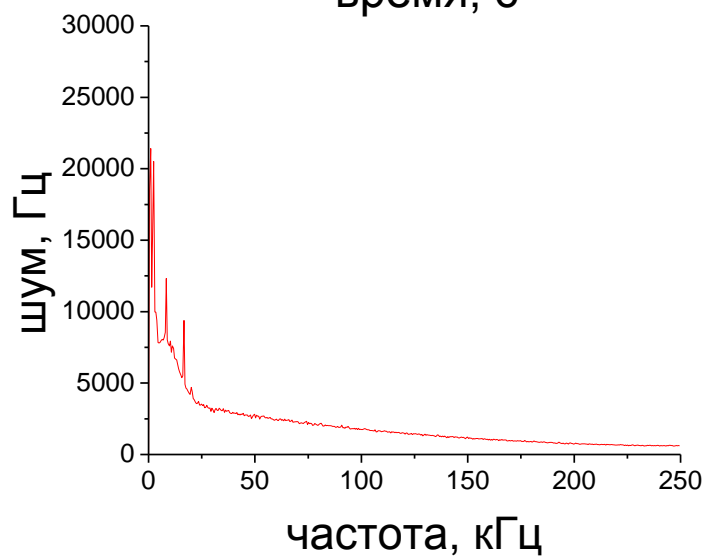
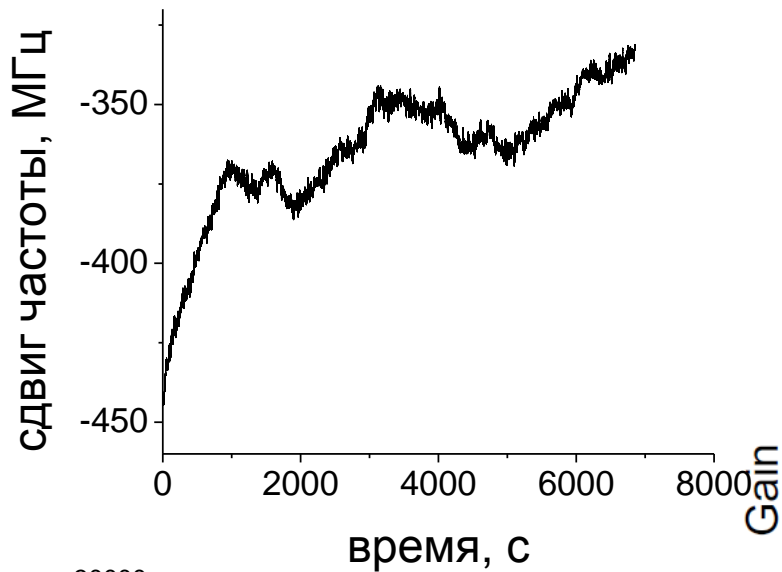


Диаграмма Бод системы АПЧ (требуемая)

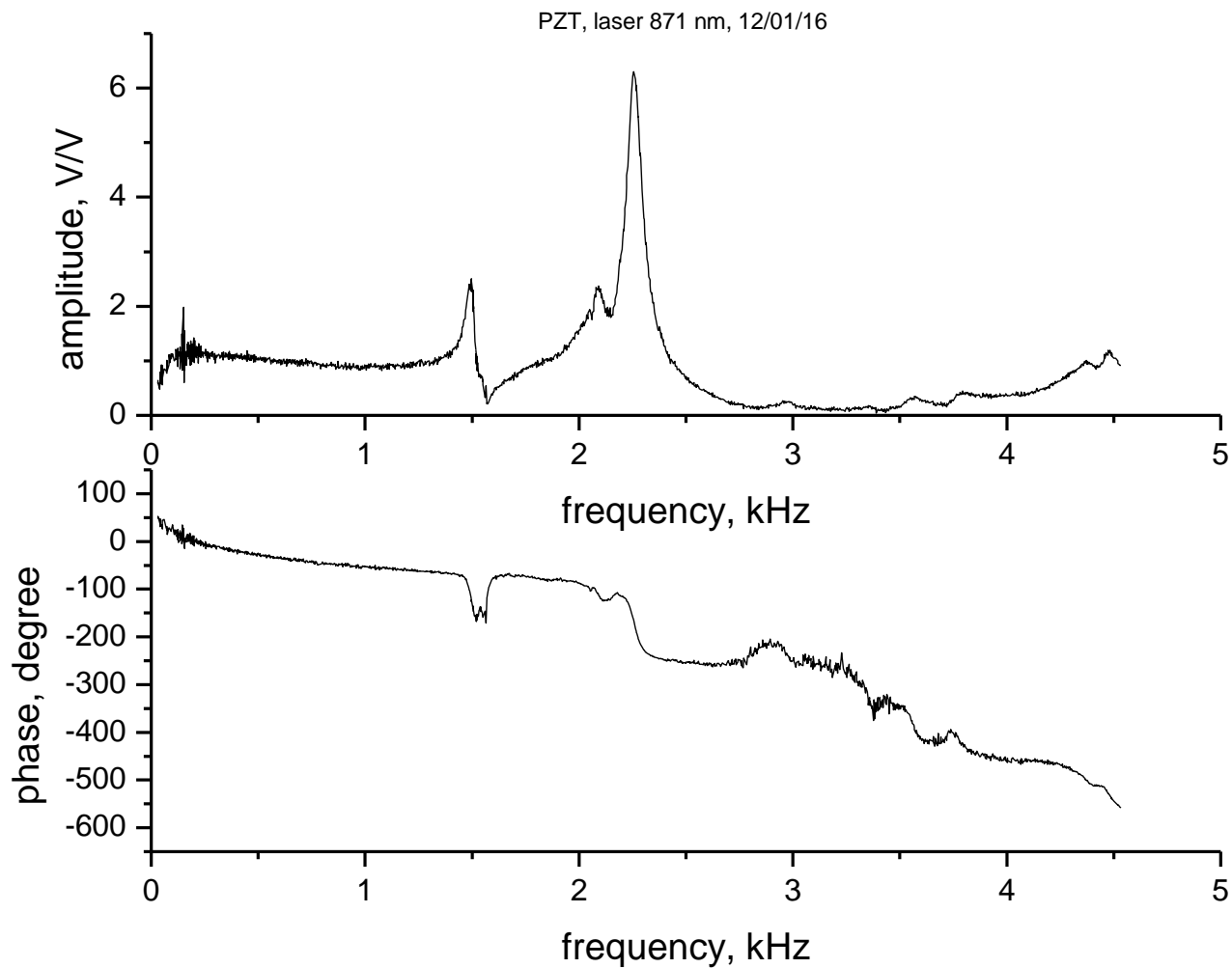


Программное обеспечение

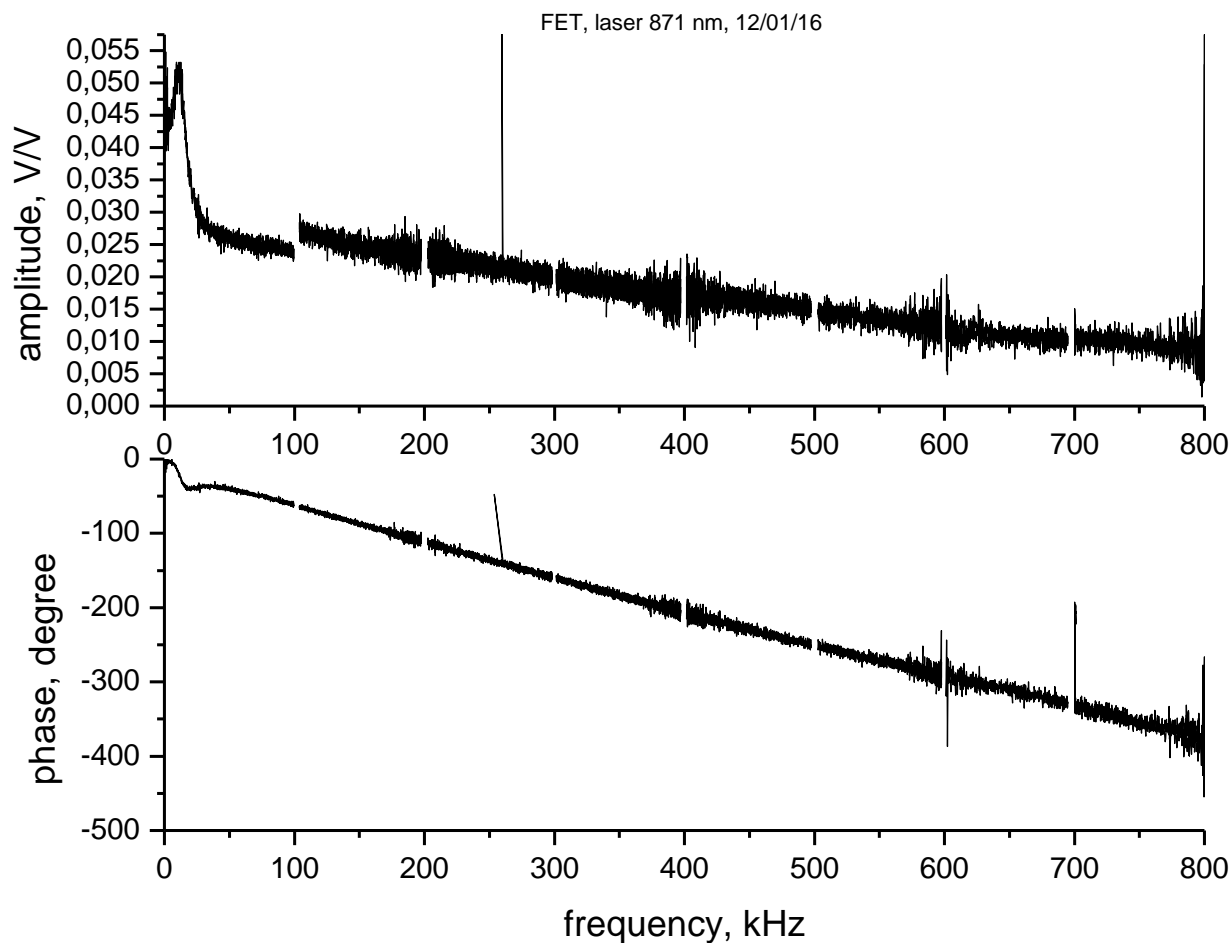
LCARD E14-440D,
АЦП 400 кГц, 14 бит, 16 каналов
ЦАП 125 кГц, 12 бит, 2 канала
Полоса пропускания входного тракта - ?
(100% > 1МГц)



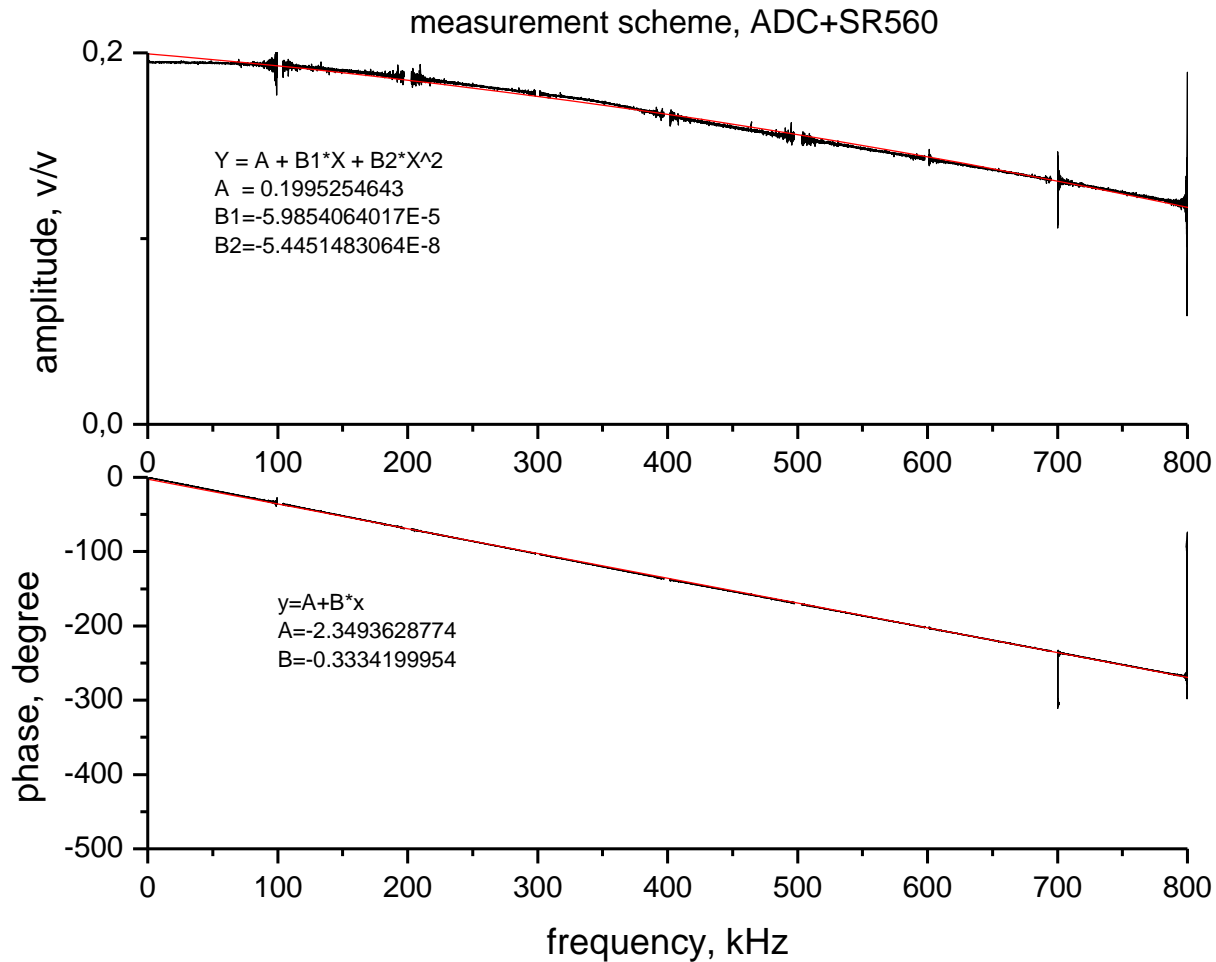
АЧХ и ФЧХ керамики «часового» лазера



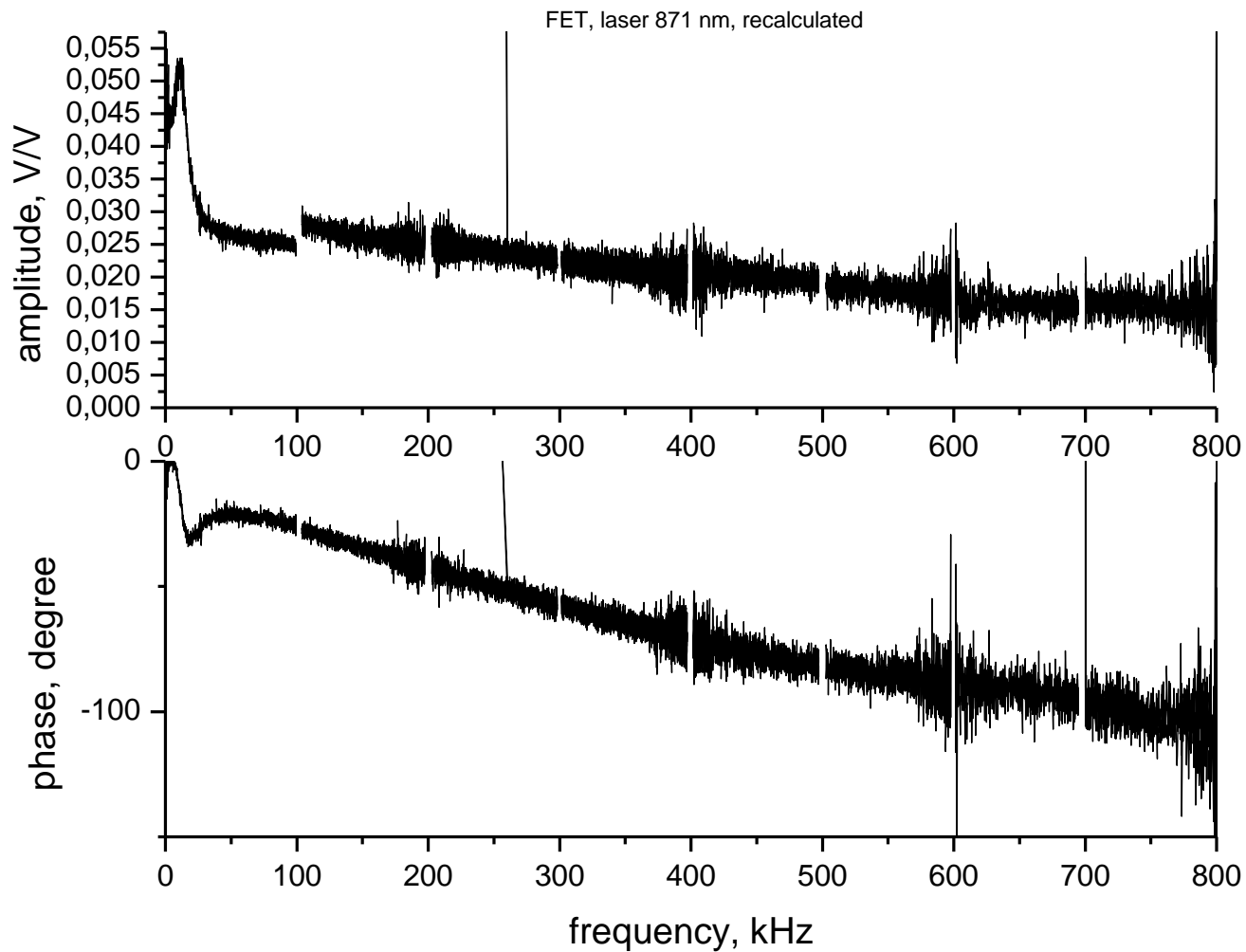
АЧХ и ФЧХ входа FET часового лазера (предварительный результат)



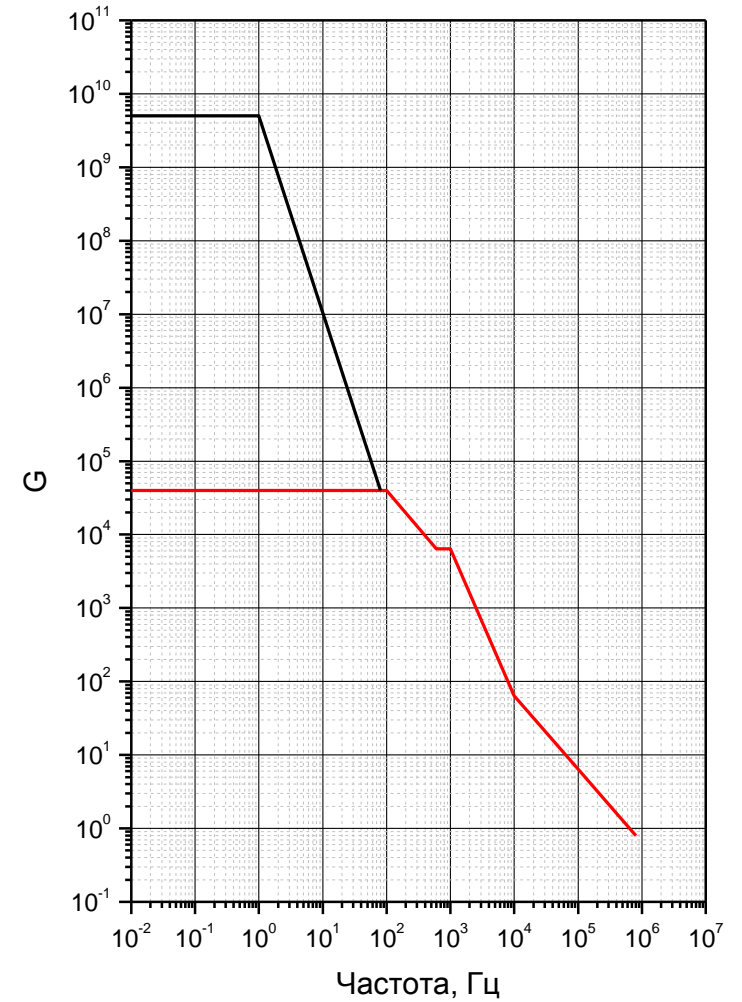
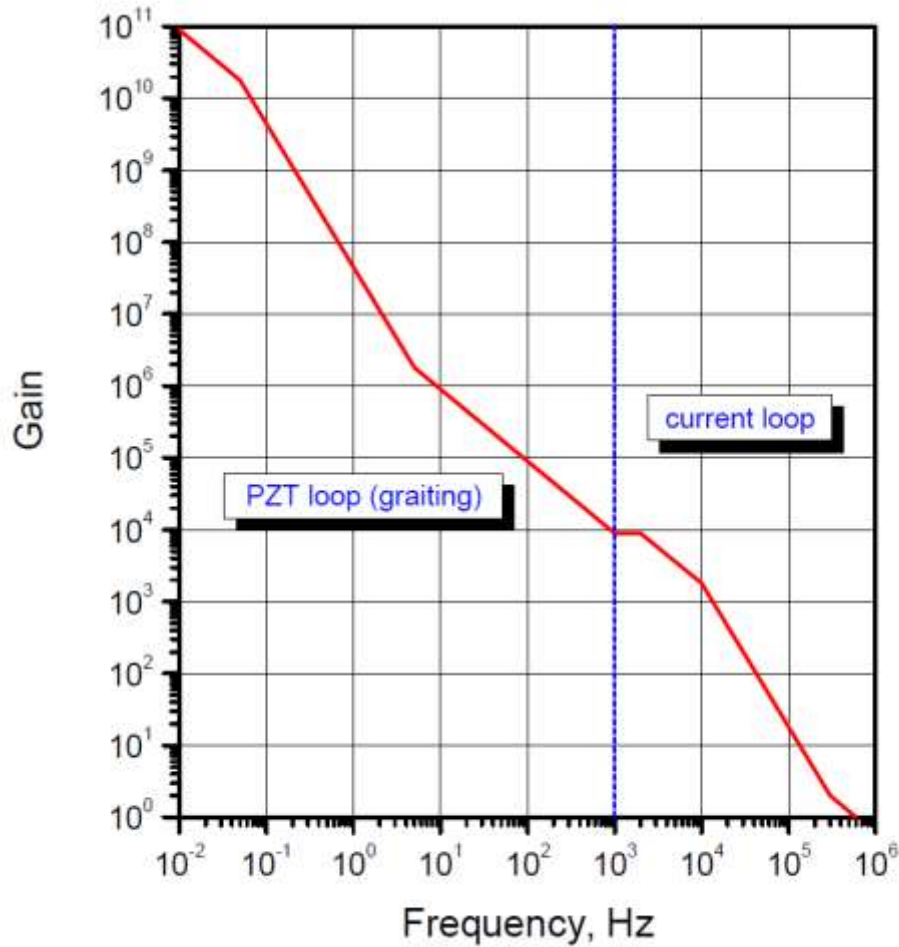
АЧХ и ФЧХ измерительной схемы



АЧХ и ФЧХ входа FET часового лазера (перерасчет)

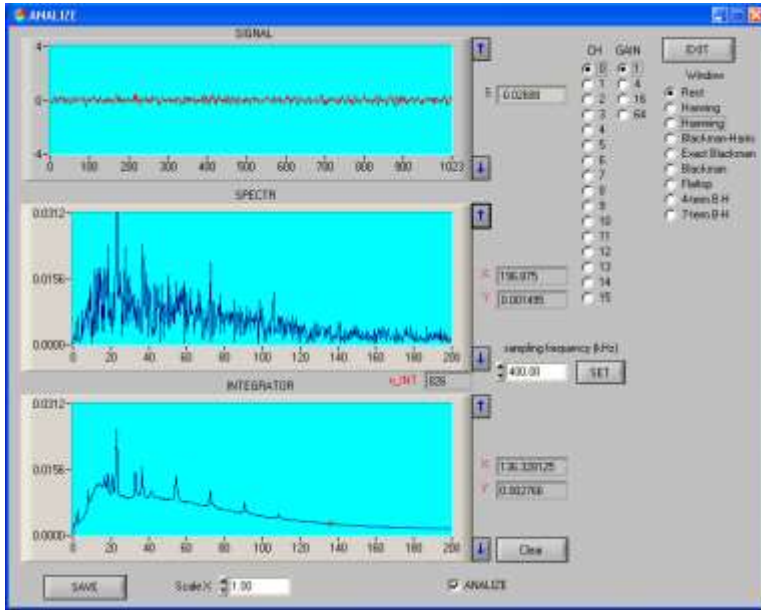


Система АПЧ



Стабилизация частоты

1



$$F_{\text{mod}} = 25 \text{ MHz}$$

$$U_{\text{ref}} = 2.8 \text{ Vpp}$$

$$U_{\text{mod}} = 0 \text{ dBm}$$

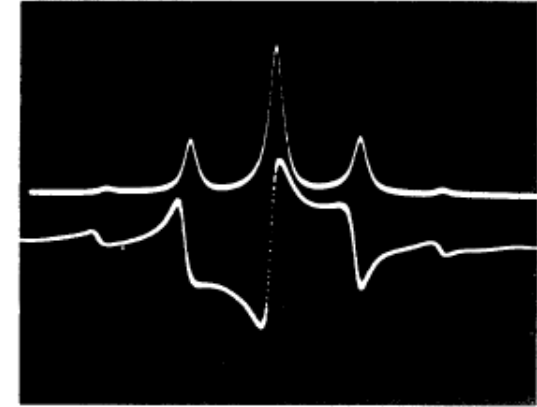
$$P_{\text{in}} = 50 \text{ мкВт}$$

$$F \sim 300000$$

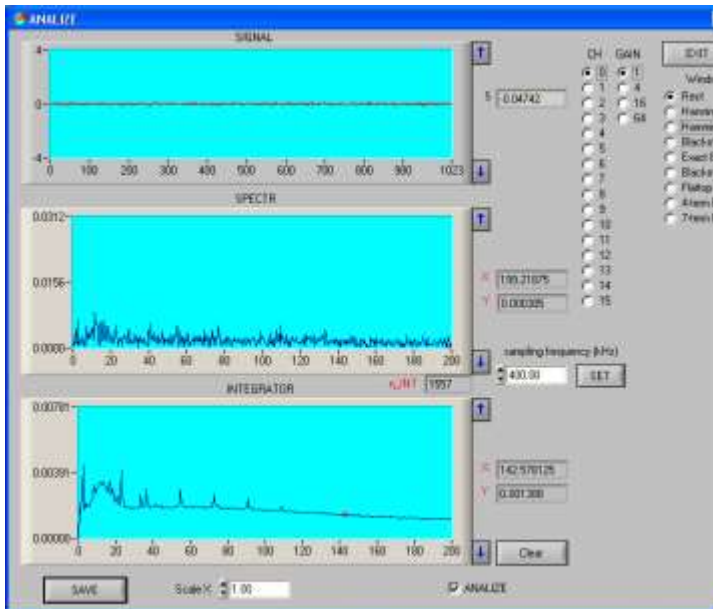
$$L \sim 100 \text{ mm}$$

$$\Delta\nu = c/2L = 1500 \text{ МГц}$$

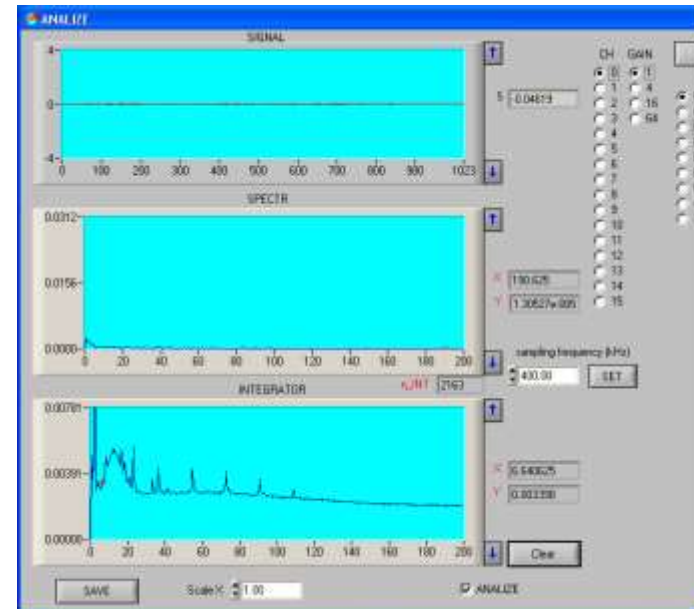
$$K \sim (0.1 \text{ V} * 10) / 5 \text{ кГц}$$



2

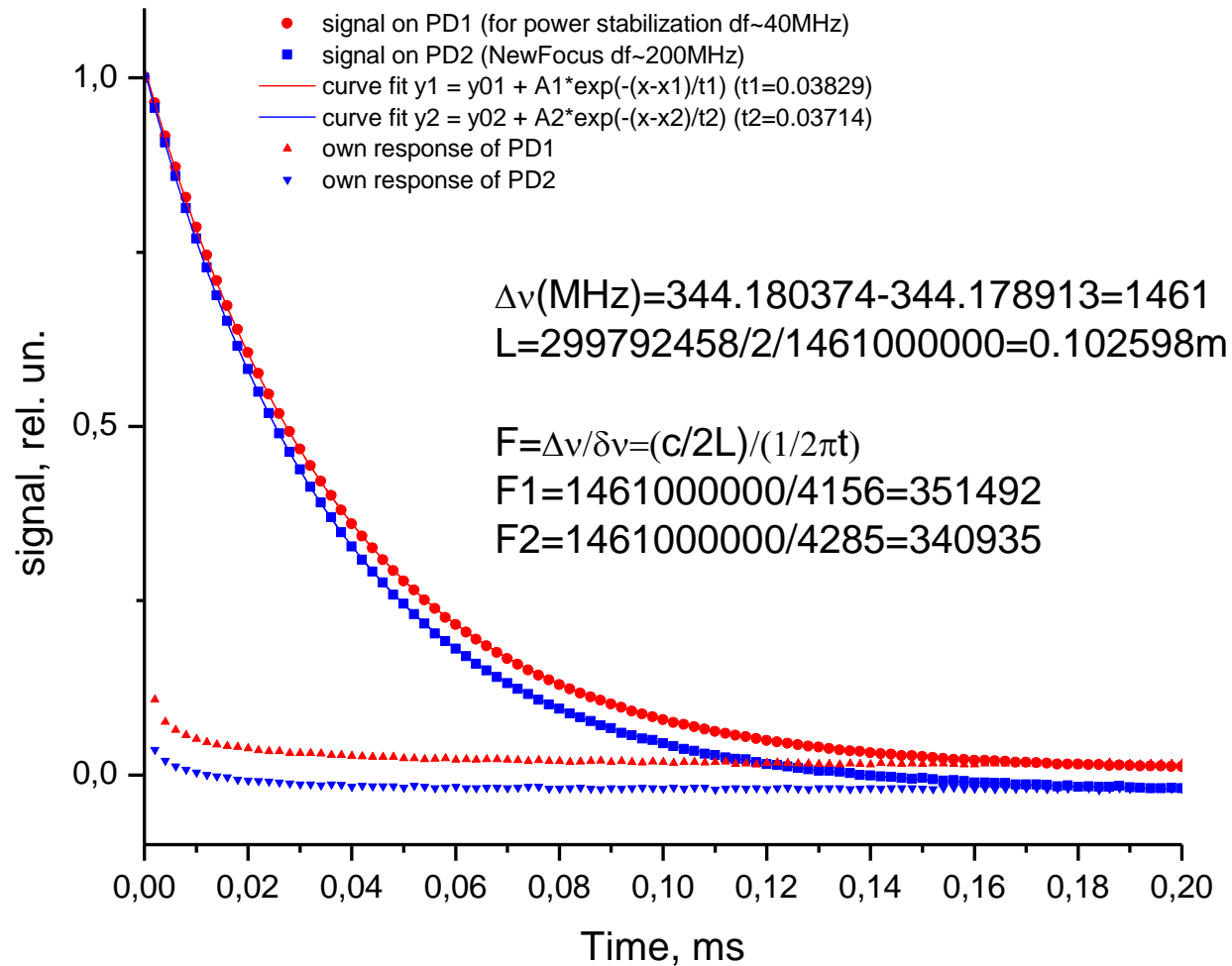


3



Время жизни света в интерферометре Фабри-Перо

09.03.2016

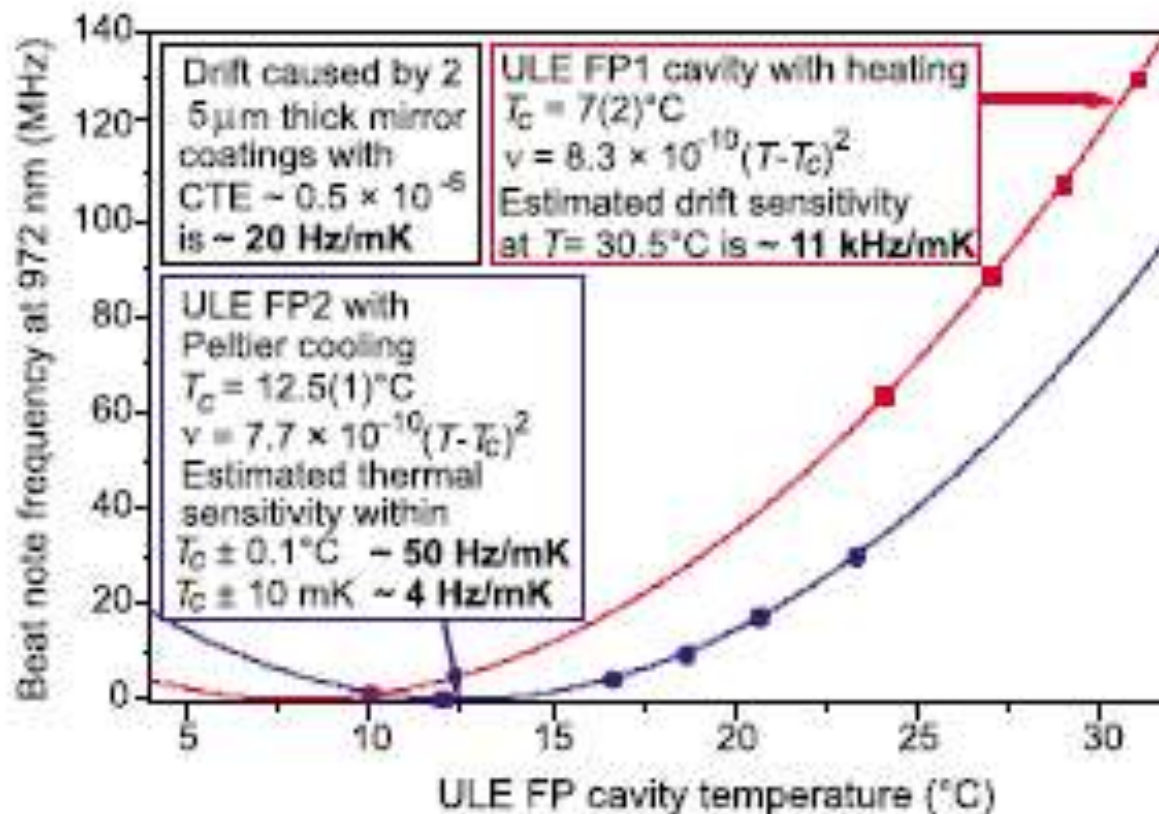


Поиск «нулевой» точки эталона (исходные данные)

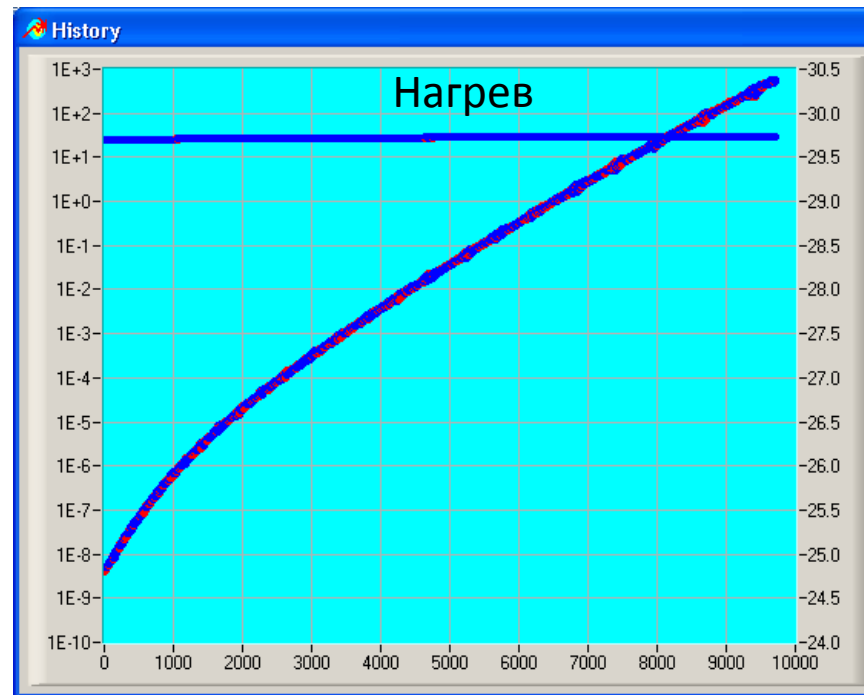
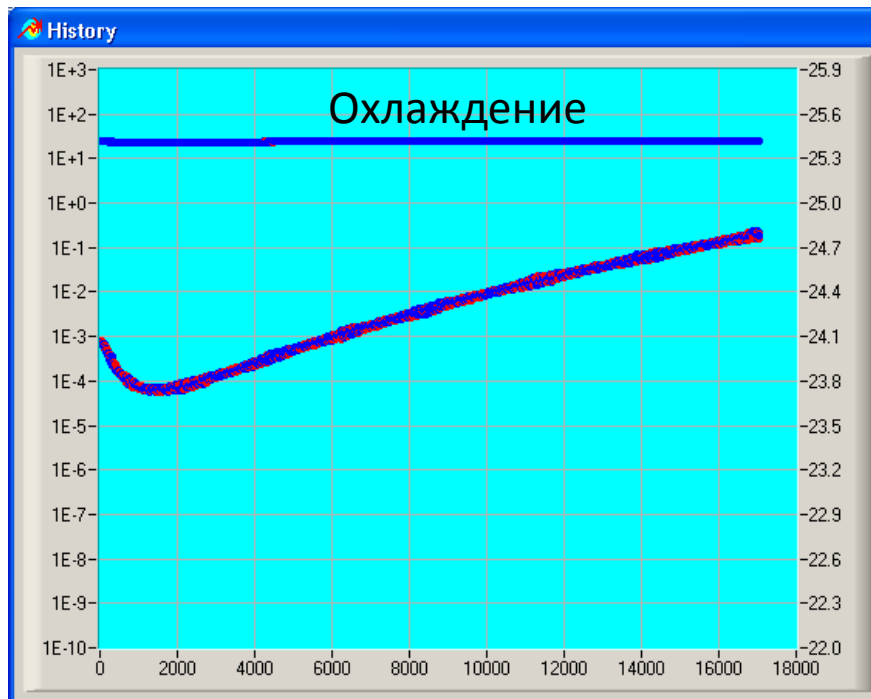
ALNIS *et al.*

ALNIS *et al.*

PHYSICAL REVIEW A 77, 053809 2008

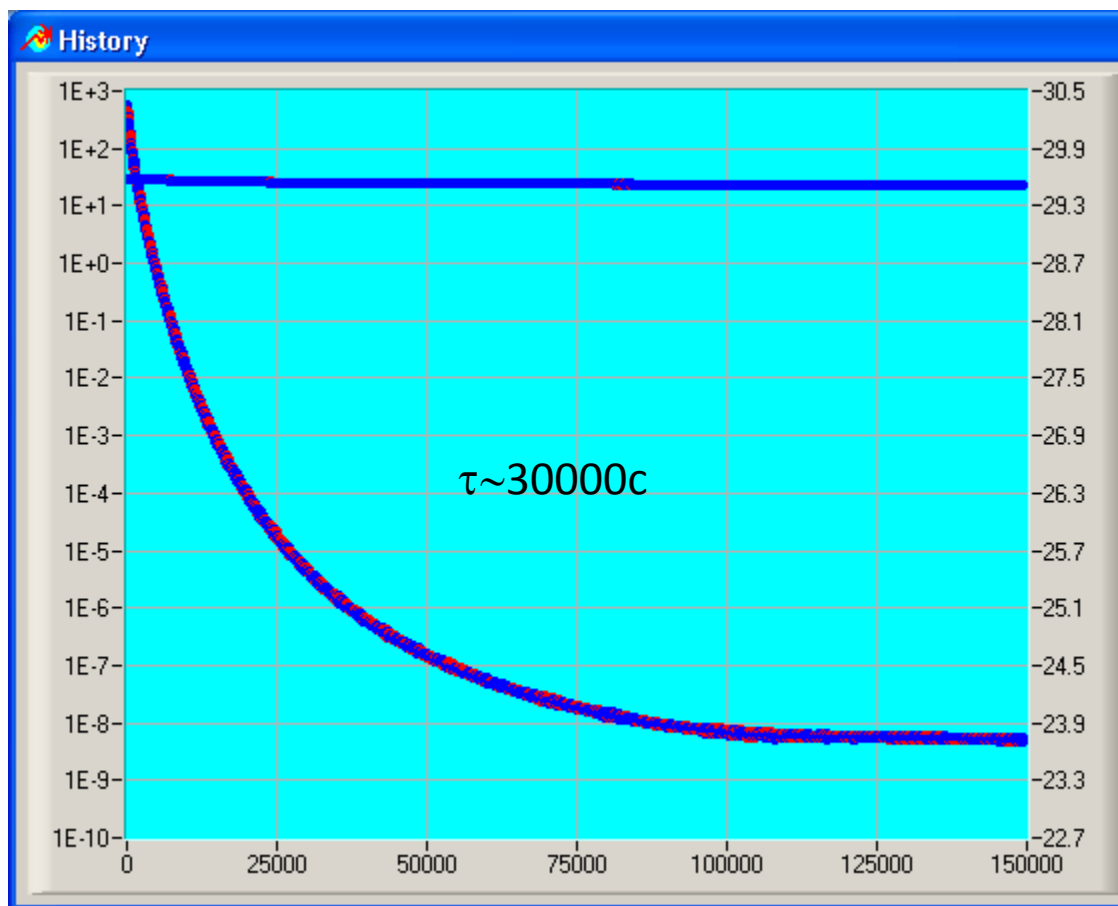


Работа внутренних элементов Пельтье (ток 1А)



Причина?

Постоянная времени системы



Волоконный синтезатор FC1500-250-WG

Specifications

Advanced Features and Benefits

- high repetition rate
- fully fiber-coupled interferometer
- operational range from 500 nm to 2100 nm
- extended offset frequency tuning range
- turnkey metrology system, fully automated with comb control and data acquisition software



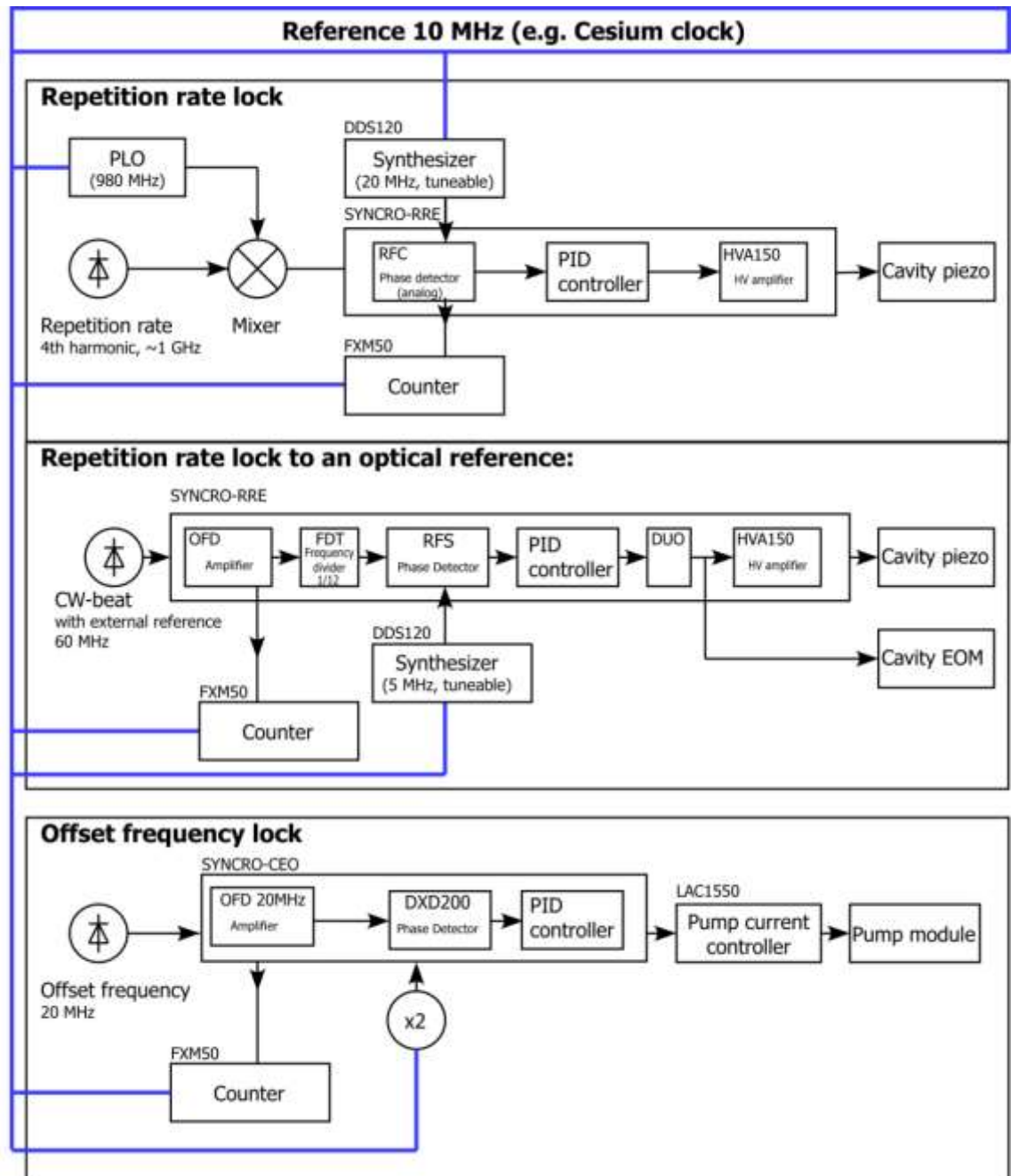
FC1500-250-WG	
Comb spacing	250 MHz
Accuracy	10^{-14} in 120 s or same as reference, whichever applies first
Stability	5×10^{-13} in 1 s or same as reference, whichever applies first
Tuning range of comb spacing	>2 MHz
Tuning range of offset frequency	>250 MHz
Wavelength range	1050-2100 nm and 500-1050 nm* *with optional M-NIR and M-VIS extension packages

$$v_{\text{laser}} = \pm 2 * v_{\text{offset}} + n * v_{\text{rep}} \pm v_{\text{beat}}$$

4 CH counter FXM50 (K+K)

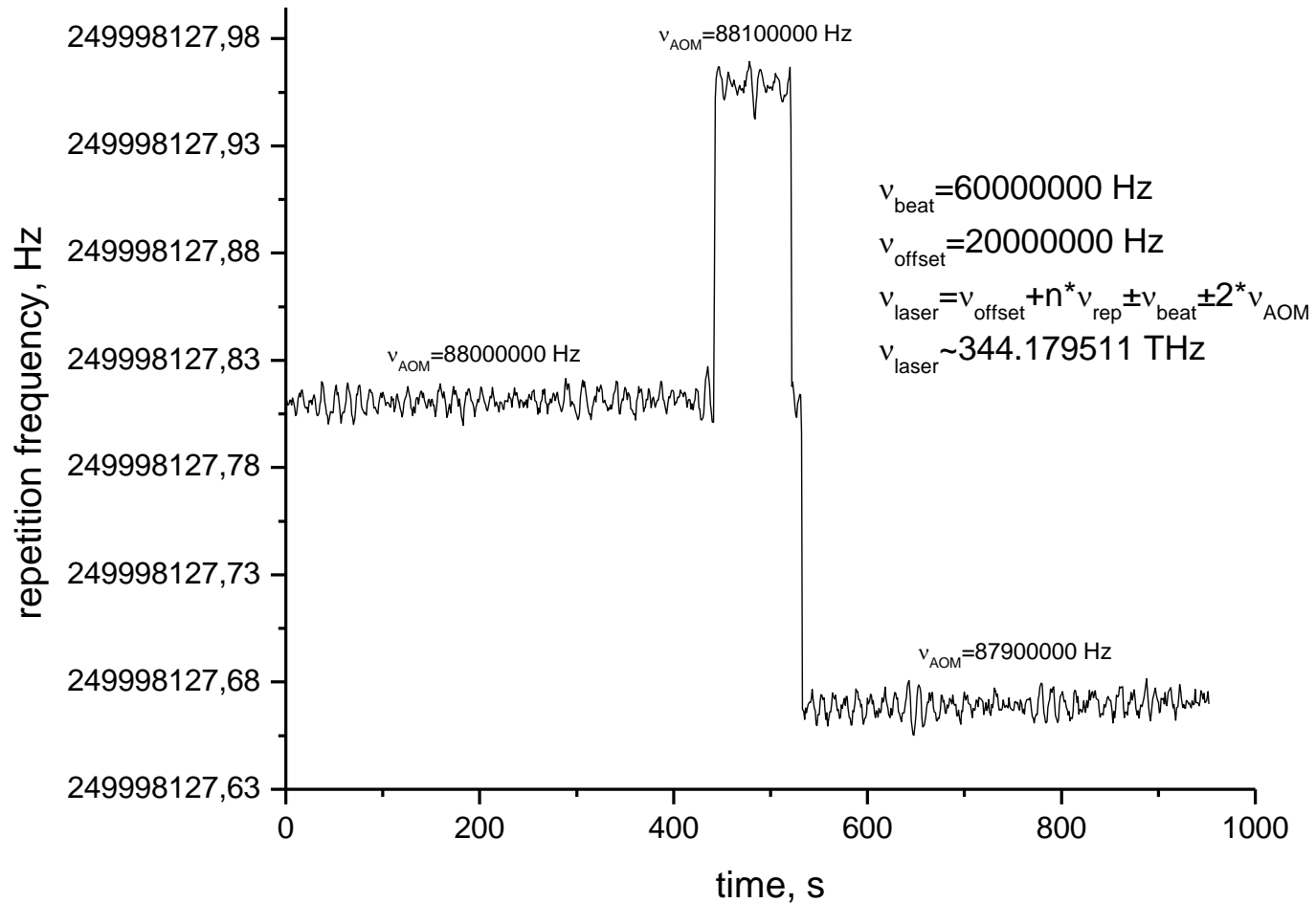
Counter View

Laser	
Downmixed repetition rate	Allan Variance
20'001'256.022	1.402
Offset Beat	Allan Variance
22'123'733.908	29'811.730
CW Beat	
CW Beat 1: 633 nm	Allan Variance
1'073'741'824.001	0.002
Channel #4	Allan Variance
1'073'741'824.000	0.000



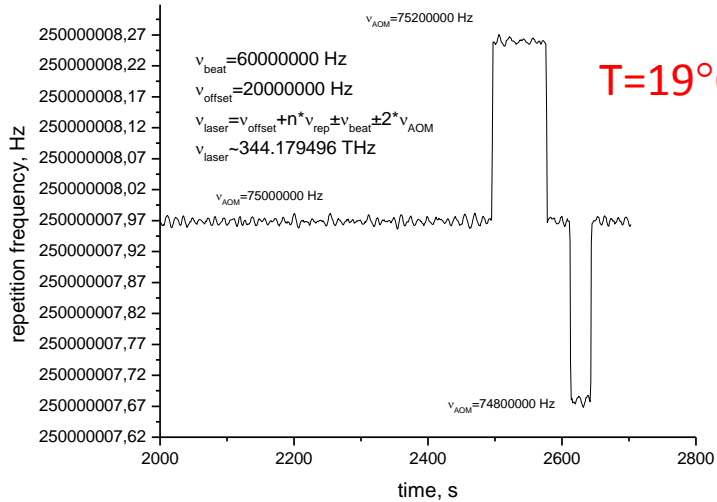
Измерение абсолютной частоты лазера с помощью комба от MenloSystem (измерение межмодовой частоты F_{rep})

10.02.2016

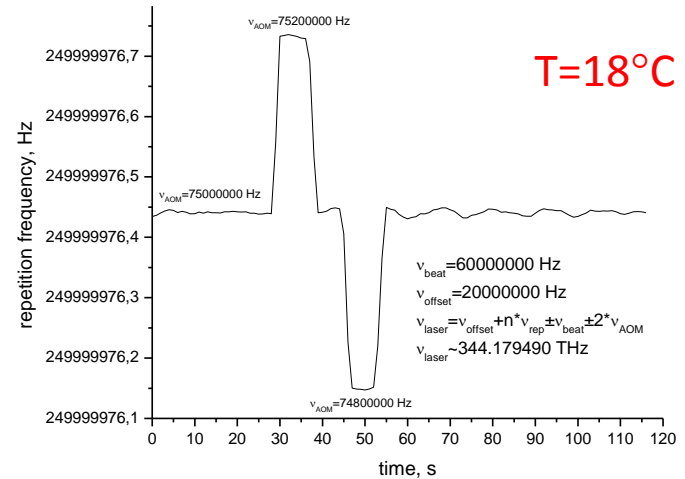


Поиск нулевой точки

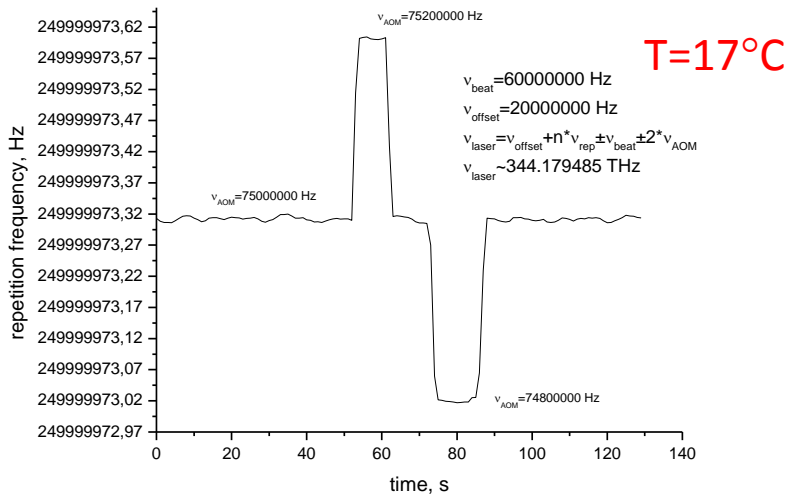
28.06.2016
Tcavity=19.0



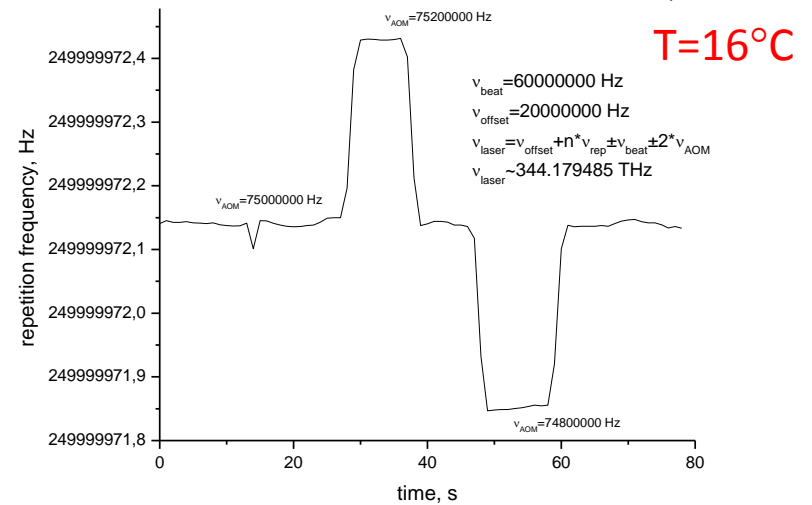
29.06.2016
Tcavity=18.0



30.06.2016
Tcavity=17.0



01.07.2016
Tcavity=16.0



Поиск нулевой точки

$$\nu_{\text{laser}} = \pm 2 * \nu_{\text{offset}} + 1376718 * \nu_{\text{rep}} \pm \nu_{\text{beat}}$$

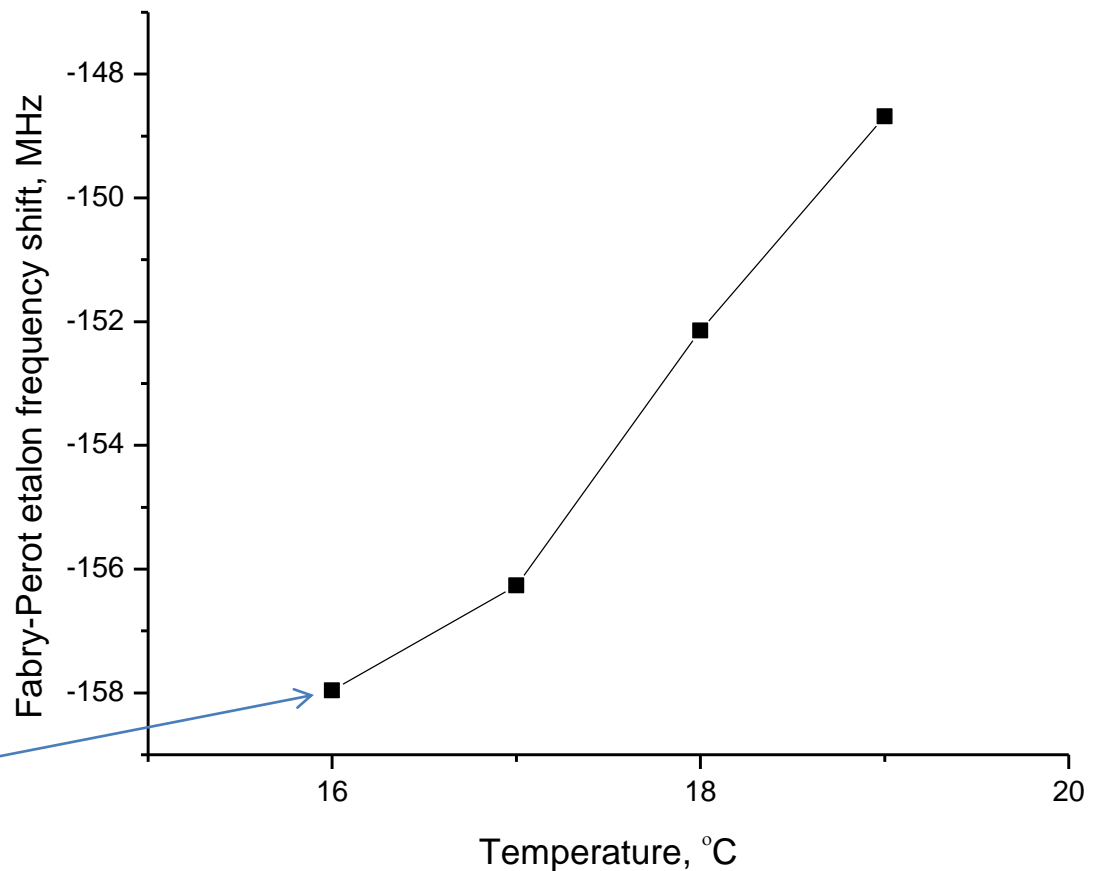
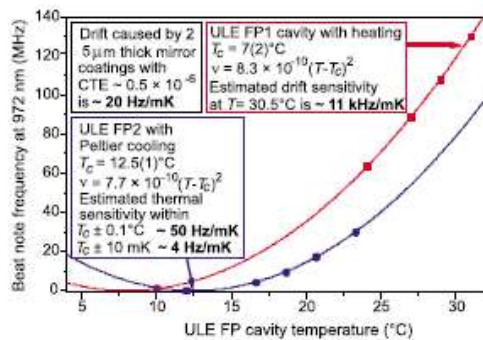
$$\nu_{\text{beat}} = 60000000 \text{ Hz}$$

$$\nu_{\text{offset}} = 20000000 \text{ Hz}$$

$$\nu_{\text{aom}} = 75000000 \text{ Hz}$$

$$\nu_{\text{etalon}} = \nu_{\text{laser}} - 2\nu_{\text{aom}}$$

ALNIS *et al.*



Tset=16.0

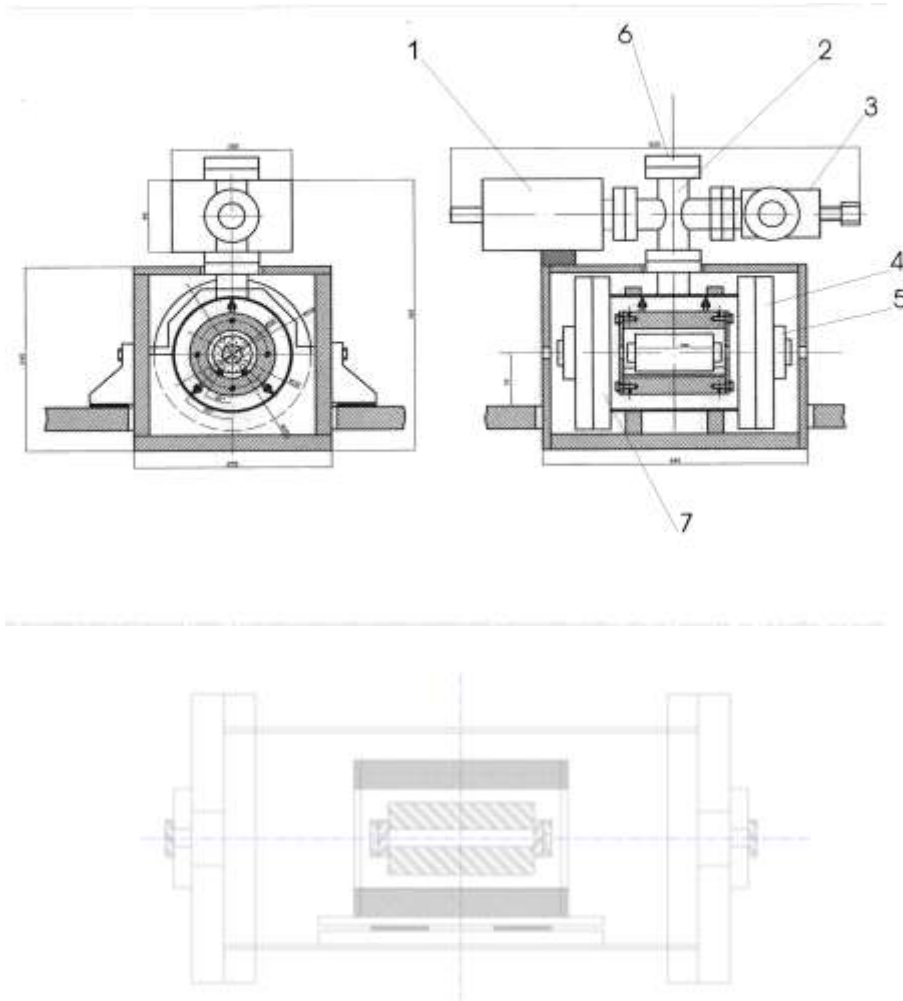
Tact=16.5

Tact ≠ Tset

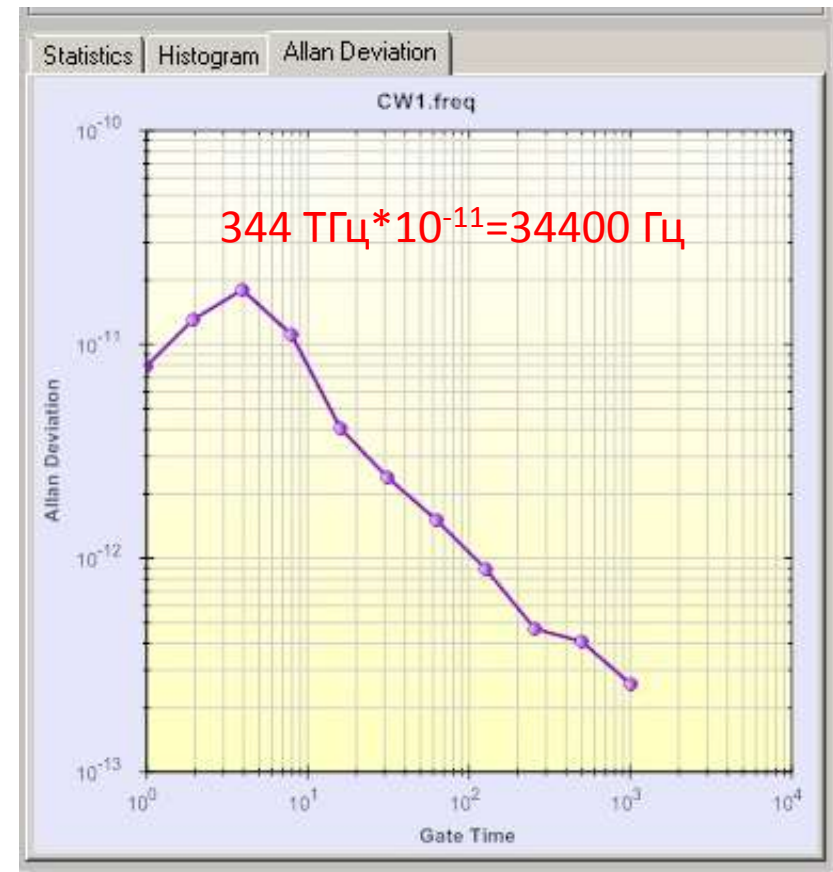
Дальше без внутреннего контура термостабилизации идти невозможно...

Что делать дальше?

Модернизация кожуха эталона



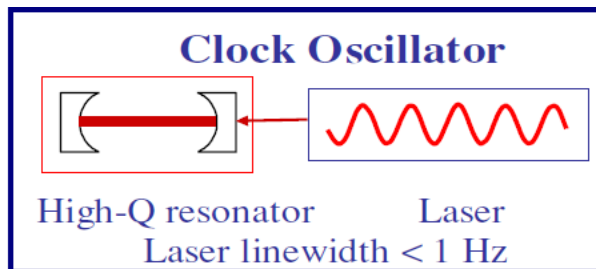
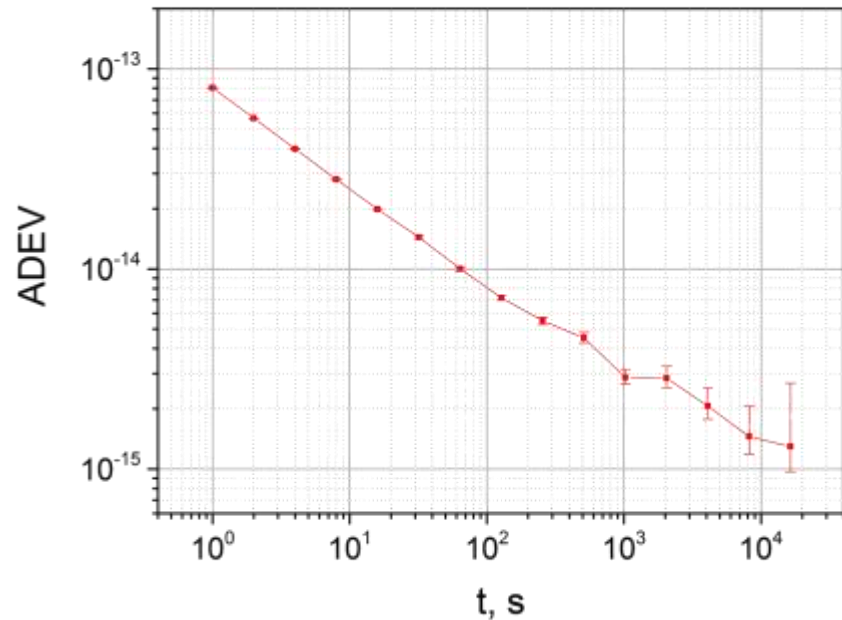
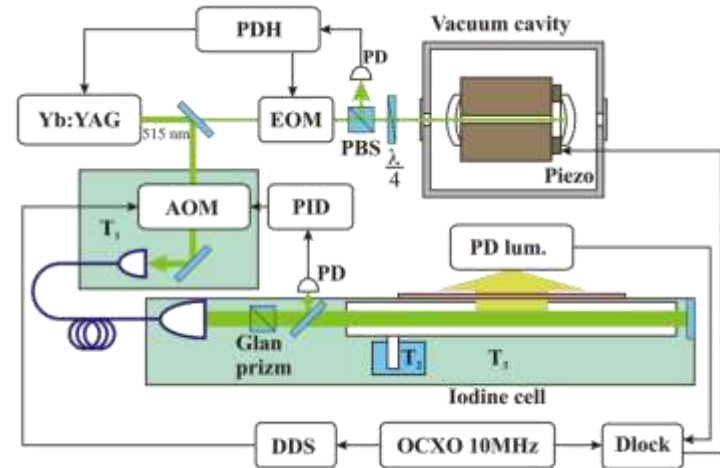
Спектроскопия часового перехода:
надо повесить точность измерения
частоты лазера



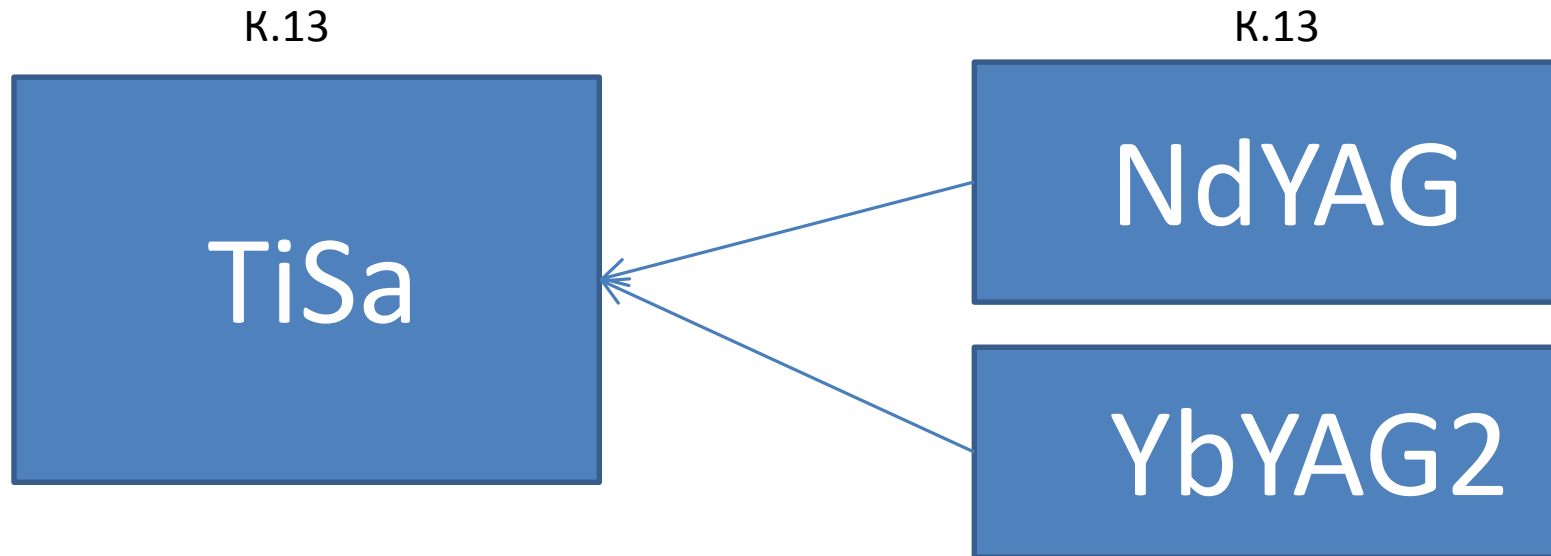
Измерение частоты в базе YbYAG



$\nu - ?$



YbYAG в базе NdYAG



$$\nu_{\text{NdYAG}} = f_0 + n * f_{\text{rep}} \pm \nu_{\text{beat1}}$$
$$\nu_{\text{YbYAG}} = f_0 + k * f_{\text{rep}} \pm \nu_{\text{beat2}}$$

K.14

$$\nu_{\text{YbYAG2}} = 290712807966900 \pm ? \text{Гц}$$

Программа для расчета частот

CALCULATIONS

Exit Absorption line: YbYAG3 comb ham: 1

Target (Hz): 290712808290500.00 CavityT: 18.00

Laser (Hz): 290712808290500.00 AOM: 75000000.00

Fbeat: 60000000.00 Lambdameter (cm-1): 9697.13549

Frep: 249999766.3421 Lambdameter (THz): 290.712808

F0: 20000000.00

LOAD n: 1162852 Daom: 200000.00

Freq: 290712808290443.69 Frep1: 0.00

Diff: 56.31 Frep2: 0.00

CALCULATIONS

Exit Absorption line: Quadrupole comb ham: 2

Target (Hz): 688358979309307.00 CavityT: 18.00

Laser (Hz): 344179489654653.50 AOM: 75000000.00

Fbeat: 21335923.94 Lambdameter (cm-1): 11480.59201

Frep: 249999766.3421 Lambdameter (THz): 344.179490

F0: 20000000.00

LOAD n: 1376719 Daom: 200000.00

Freq: 344179489654653.50 Frep1: 0.00

Diff: 0.00 Frep2: 0.00

Но программа CombWatch позволяет измерять только одну частоту

CW Beat Assistant

Optical Frequency 0 (1030)

Comb mode contribution: 1162852

Offset Beat: 136'385'741.951

CW Beat 1: 487'368.876

Auto CW

Auto Offs

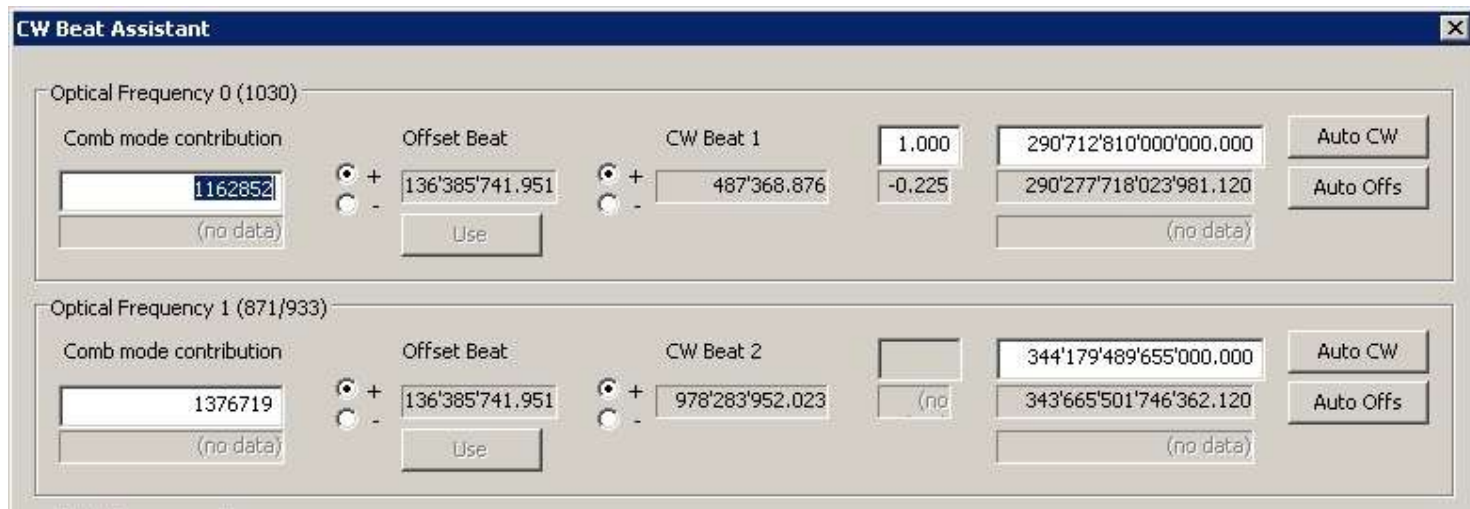
Diff: 0.00

Изменение конфигурационного файла от MenloSystem

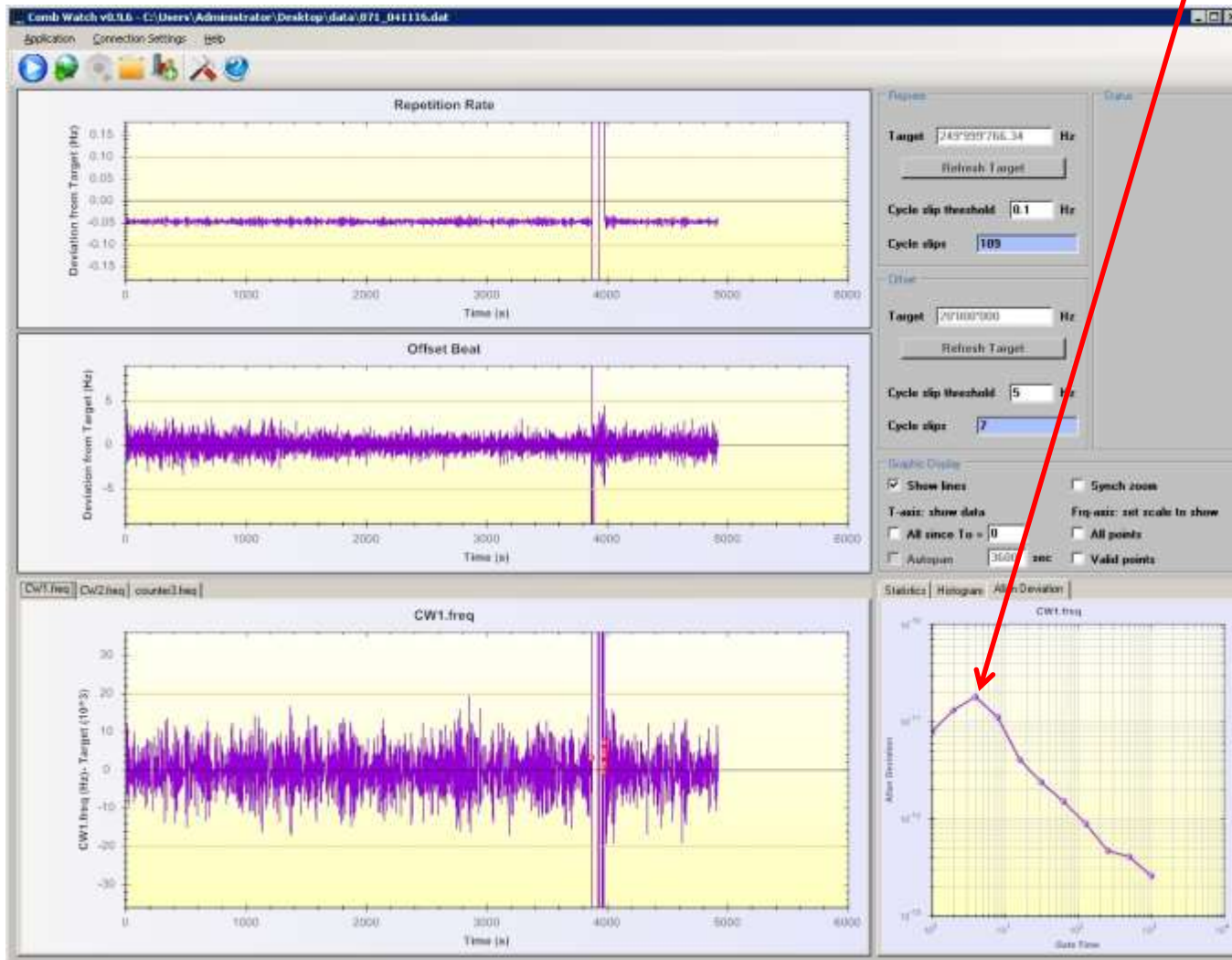
До модернизации файла fibercomb.setup от 25.06.15

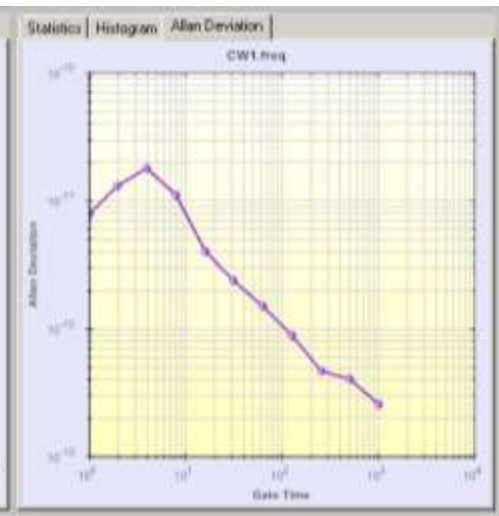
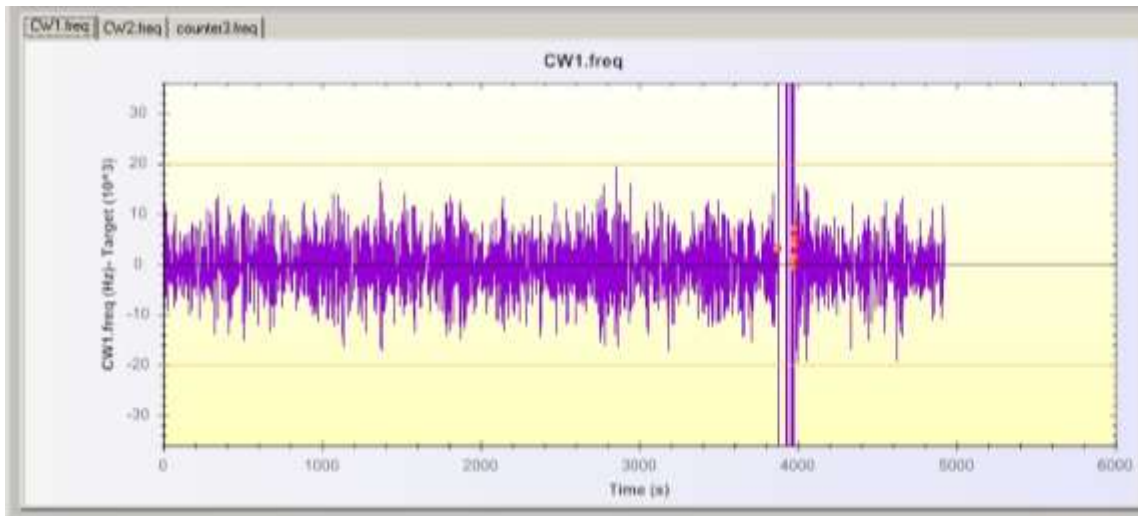


После модернизации файла fibercomb.setup 17.08.16



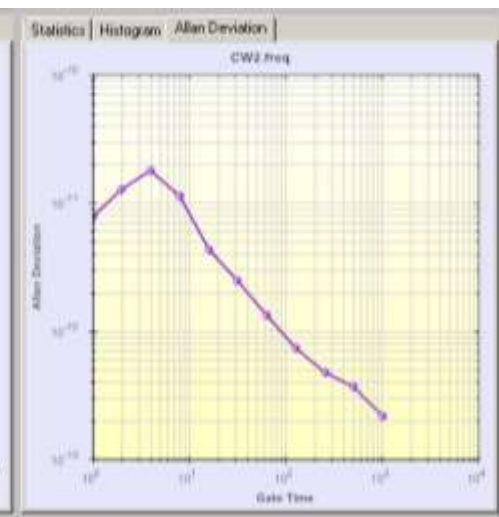
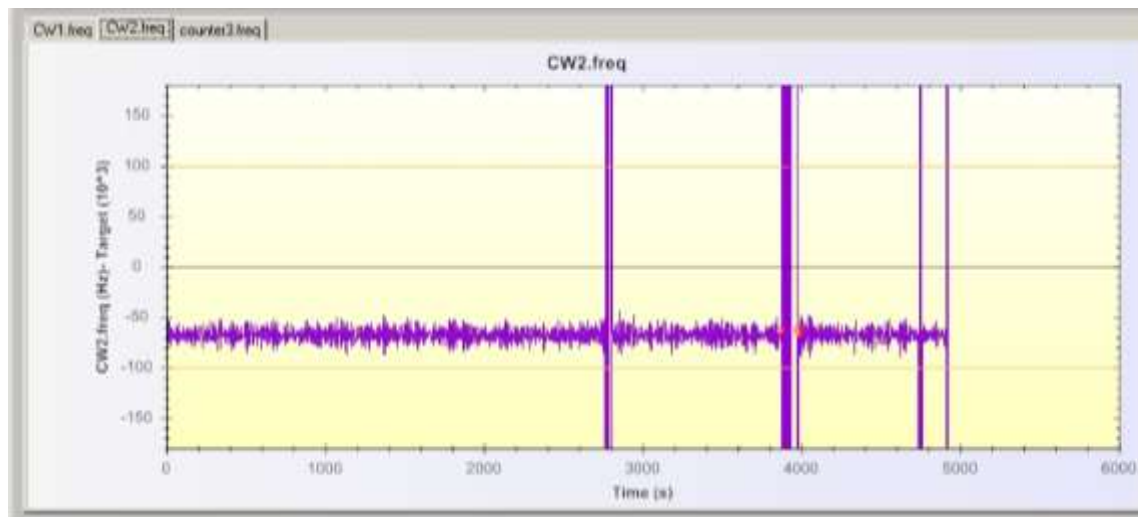
Измерения частоты в базе YbYAG, но ничего не изменилось, $\sigma(1c) \sim 10^{-11}$





$$v_{YbYAG}(CW1) = 1 * f_0 + n * f_{rep} + v_{beat1}$$

counter2
counter1
counter3



$$v_{Clock}(CW2) = 2 * f_0 + k * f_{rep} + v_{beat2}$$

counter2
counter1
counter4

теория

$$\nu_{YbYAG} = 1 * f_0 + n * f_{rep} + \nu_{beat1}$$

$$\nu_{YbYAG} = 290 \text{ ТГц (AFC to } I_2) \quad \rightarrow \Delta(\nu_{YbYAG}) < 30 \text{ Гц}$$

$$\nu_{beat1} = 60 \text{ МГц (PLL to RF)} \quad \rightarrow \Delta(\nu_{beat1}) < 1 \text{ Гц}$$

$$f_0 = 20 \text{ МГц (PLL to RF)} \quad \rightarrow \Delta(f_0) < 1 \text{ Гц}$$

$$n * f_{rep} = \nu_{YbYAG} - f_0 - \nu_{beat1}$$

$$\Delta(n * f_{rep}) = \text{SQRT}(\Delta^2(\nu_{YbYAG}) + \Delta^2(f_0) + \Delta^2(\nu_{beat1})) < 31 \text{ Гц}$$

практика

Counter1: $\Delta(f_{rep}) \sim 250 \text{ МГц} * 10^{-11} = 2.5 \text{ мГц}$

Counter2: $\Delta(f_0) \sim 20 \text{ МГц} * 10^{-11} = 0.2 \text{ мГц}$

Counter3: $\Delta(\nu_{beat1}) \sim 60 \text{ МГц} * 10^{-11} = 0.6 \text{ мГц}$

CW1: $\Delta(n * f_{rep}) = n * \Delta(f_{rep}) = 1162852 * 2.5 \text{ мГц} = 2907.13 \text{ Гц}$

$$\nu_{\text{YbYAG}}(\text{CW1}) = 1 * f_0 + n * f_{\text{rep}} + \nu_{\text{beat1}}$$

$$f_{\text{rep}} = (\nu_{\text{YbYAG}} - f_0 - \nu_{\text{beat1}}) / n$$

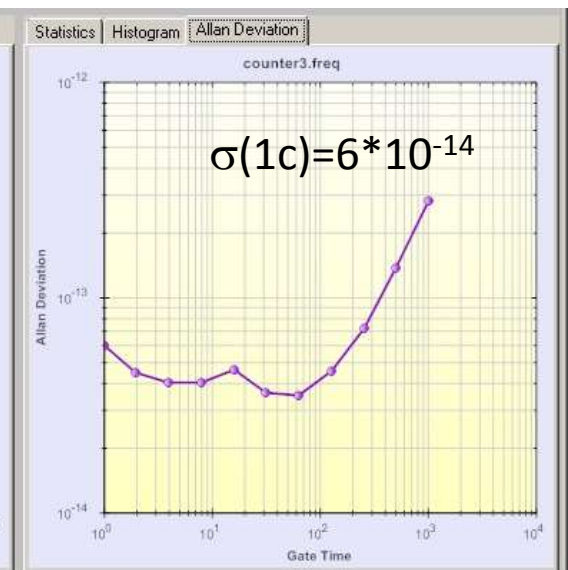
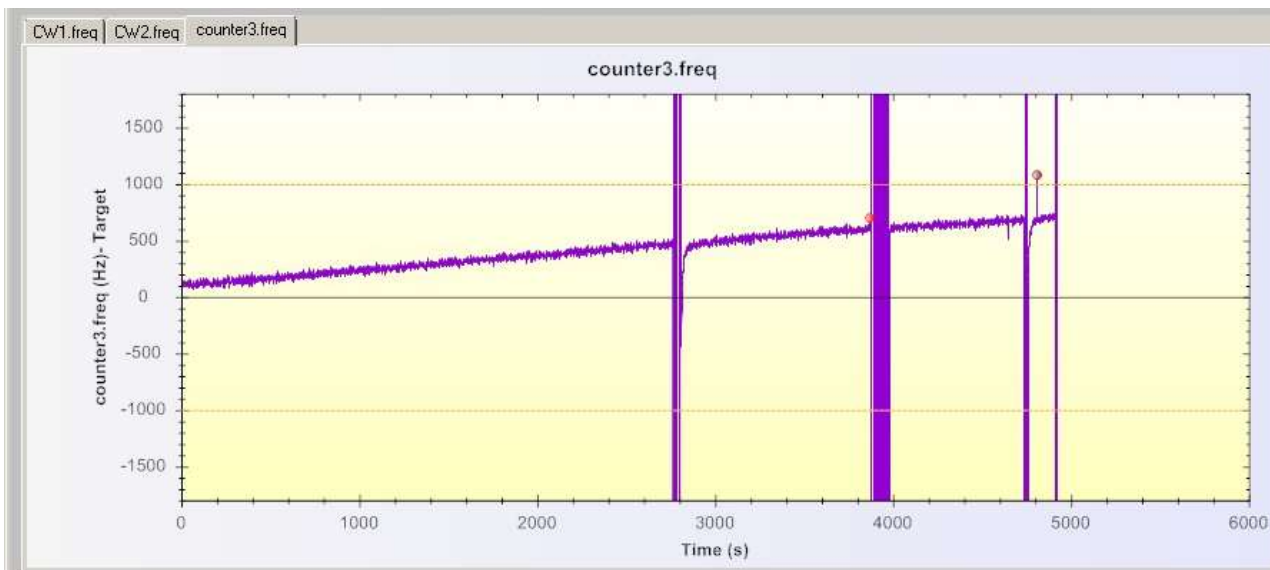
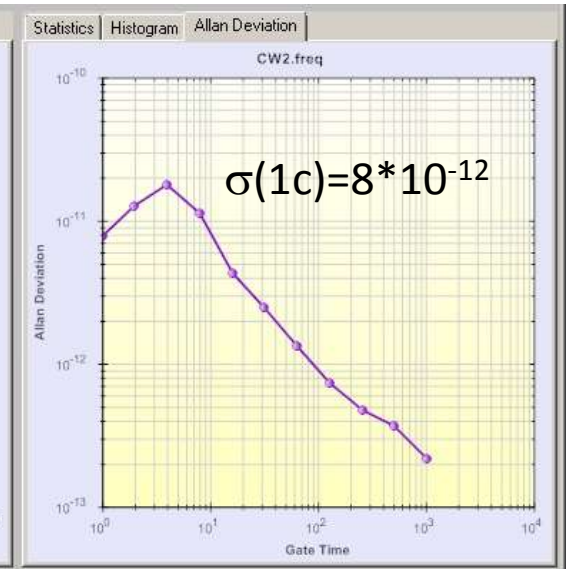
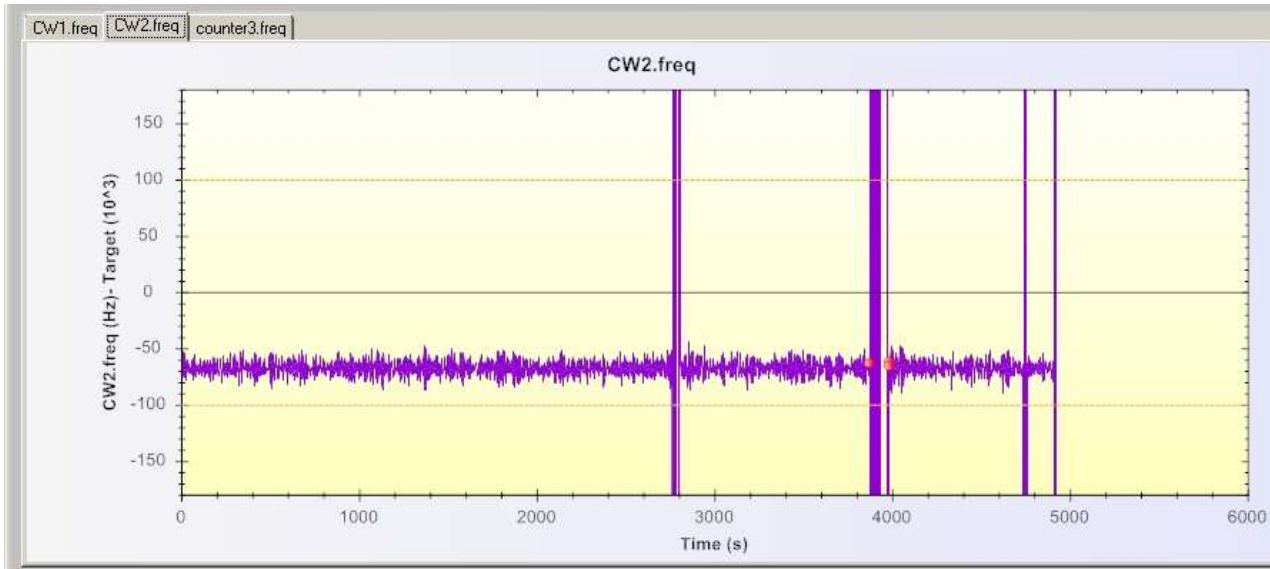
$$\nu_{\text{Clock}}(\text{CW2}) = 2 * f_0 + k * f_{\text{rep}} + \nu_{\text{beat2}}$$

$$\nu_{\text{Clock}}(\text{CW2}) = \nu_{\text{beat2}} + k * (\nu_{\text{YbYAG}} - f_0 - \nu_{\text{beat1}}) / n + 2f_0$$

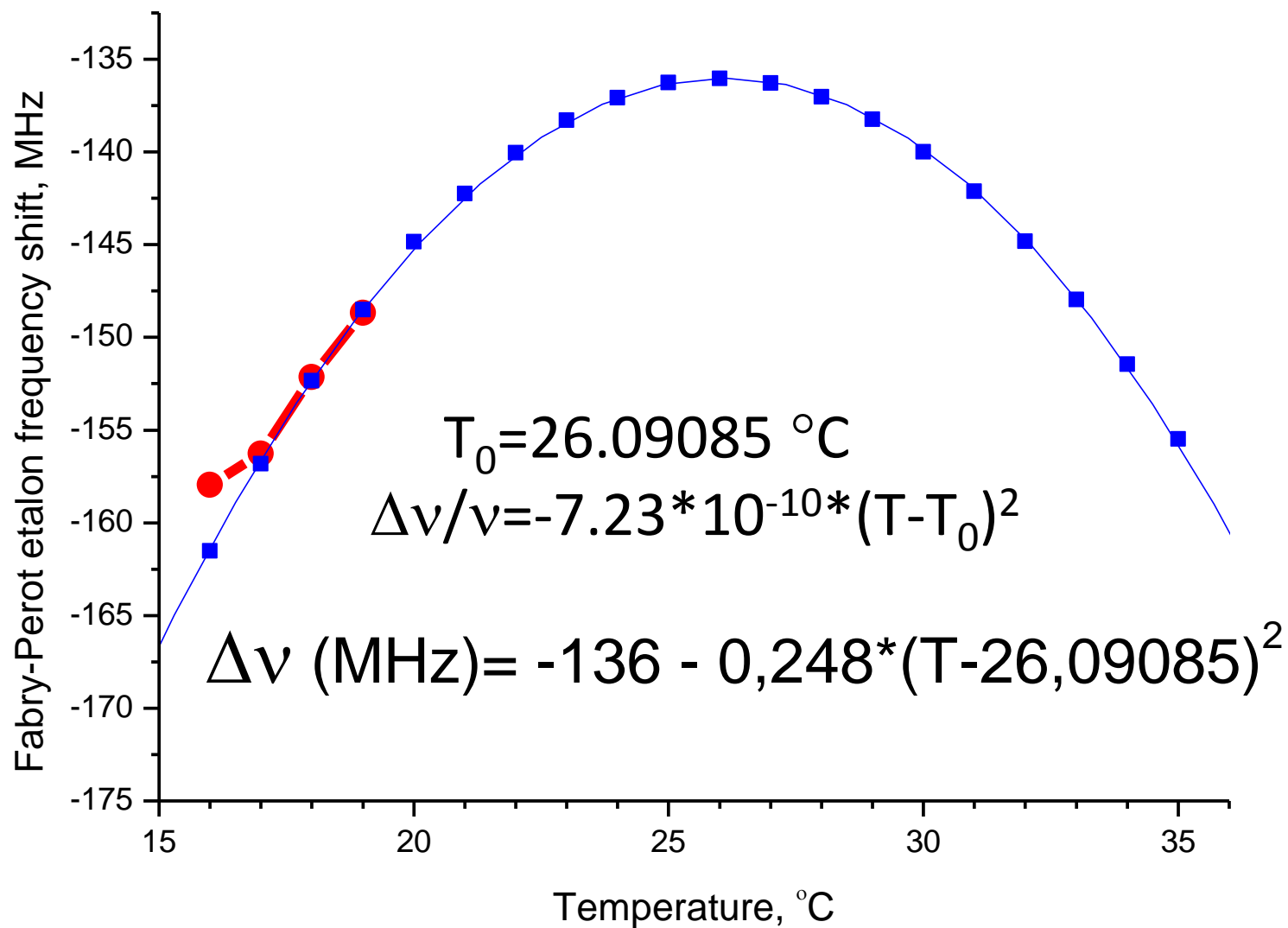
Зачем измерять CW2?

Можно измерять только ν_{beat2}

«прогресс» в точности измерений



«нулевая» точка эталона



Оценка «качества» работы системы АПЧ

(анализ шумов на выходе СД для оценки ширины линии лазера)

FFT 2ch для E20-10



LCARD E20-10

АЦП: 14 бит; 4 канала;

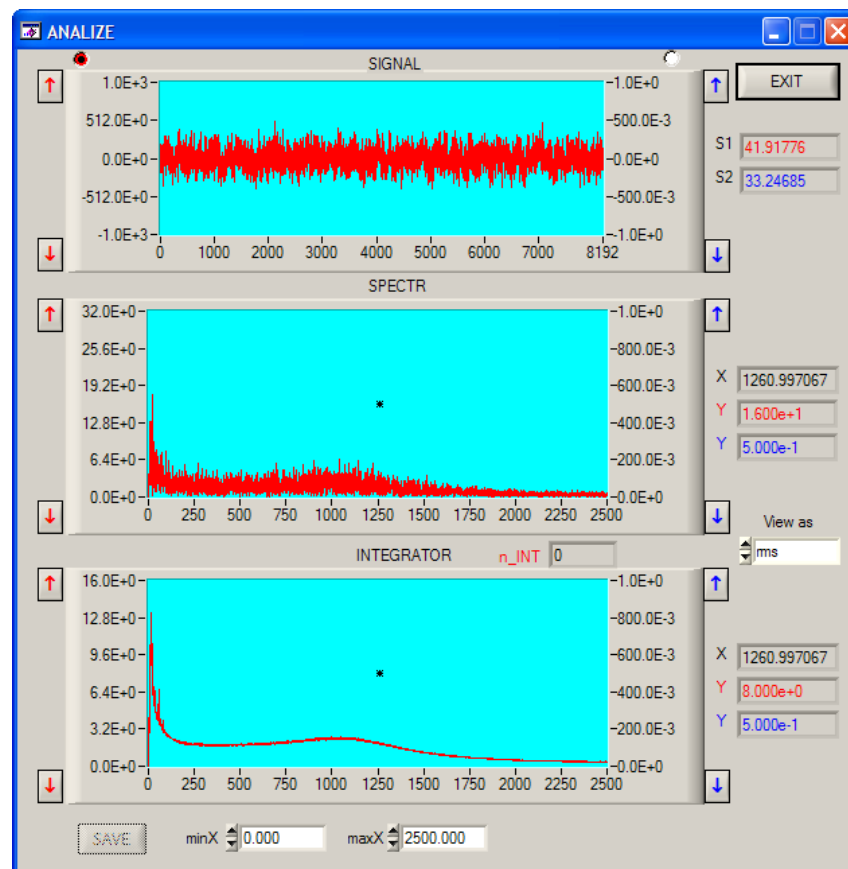
$\pm 0,3$ В...3 В; 10 МГц.

ЦАП: 12 бит; 2 канала;

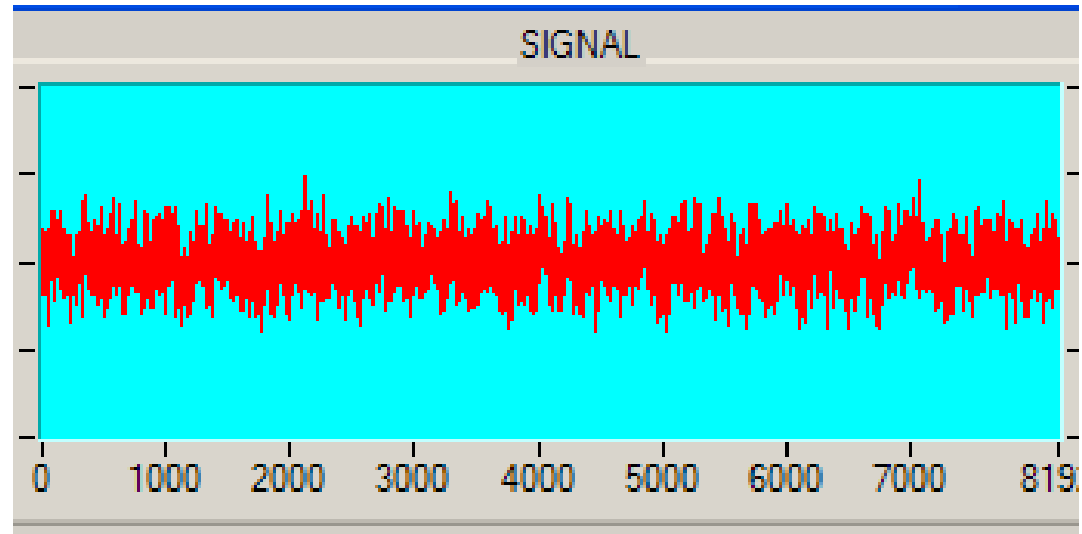
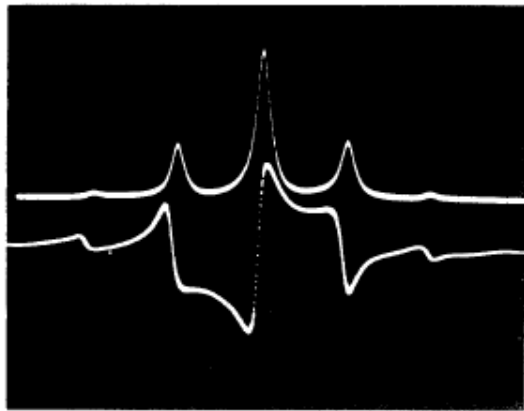
± 5 В; 8 мкс.

Цифровые входы/выходы: 16/16 ТТЛ, 5 В.

Интерфейс: USB 2.0 (high-speed)



Алгоритм обработки данных



$$U = k * \Delta v(t)$$

$$A = A_0 * \cos(2\pi * (f_0 * t + \sum \Delta v(t) * \Delta t))$$

FFT(A) → Спектр излучения лазера

Программа для анализа

M.A. Nikulin, S.A. Babin, A.K. Dmitriev, A.S. Dychkov, S.I. Kablukov,
A.A. Lugovoy, Yu.Ya. Pecherskii

«Low frequency noise distributed-feedback ytterbium fibre laser»
Quantum Electronics 39 (10) 906-910 (2009)

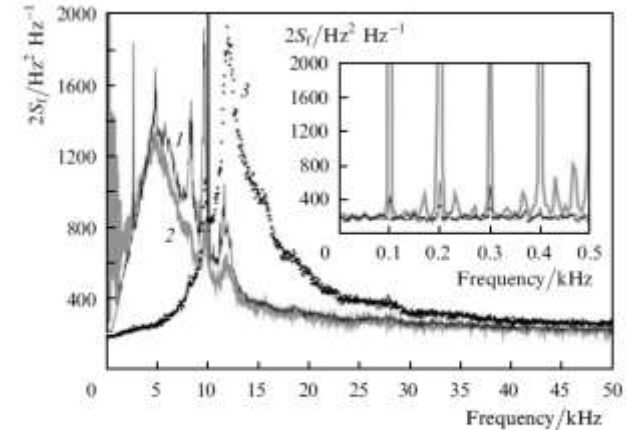
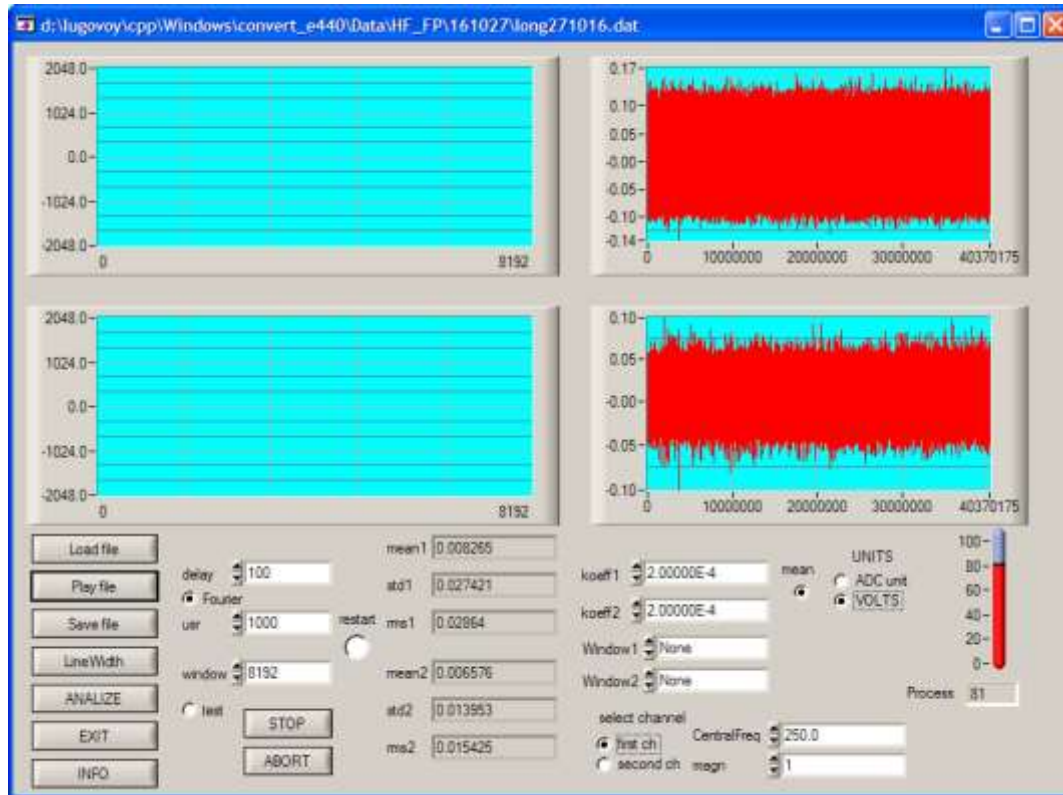


Figure 4. Power spectral density of frequency noise, $2S_f$: (1) DFB fibre laser, narrow AFC band; (2) amplifier, narrow AFC band; (3) amplifier, increased AFC band.

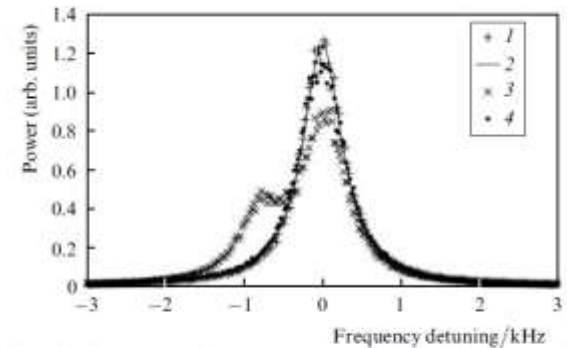
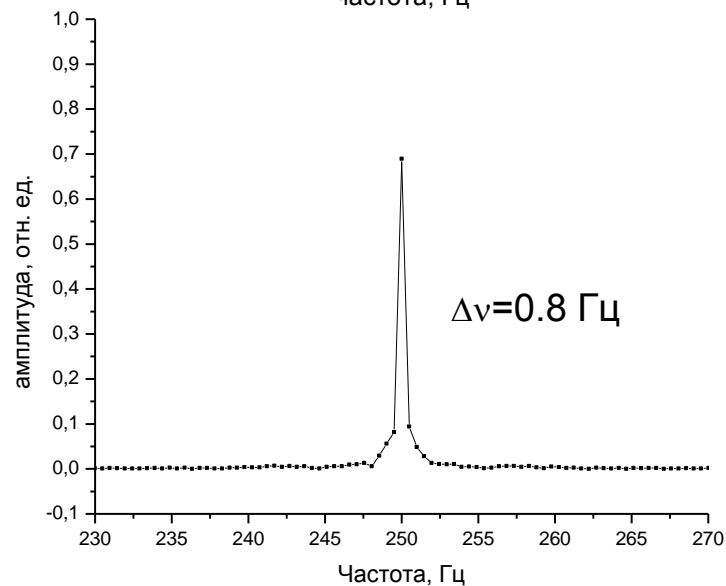
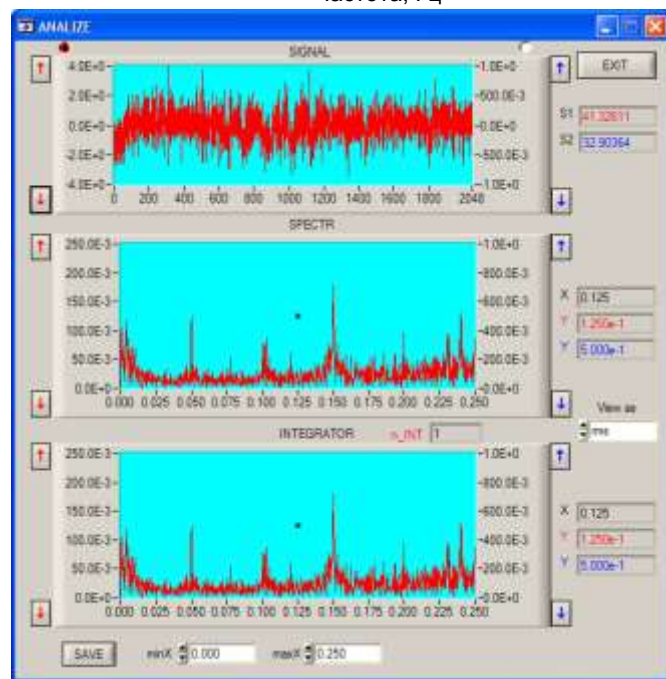
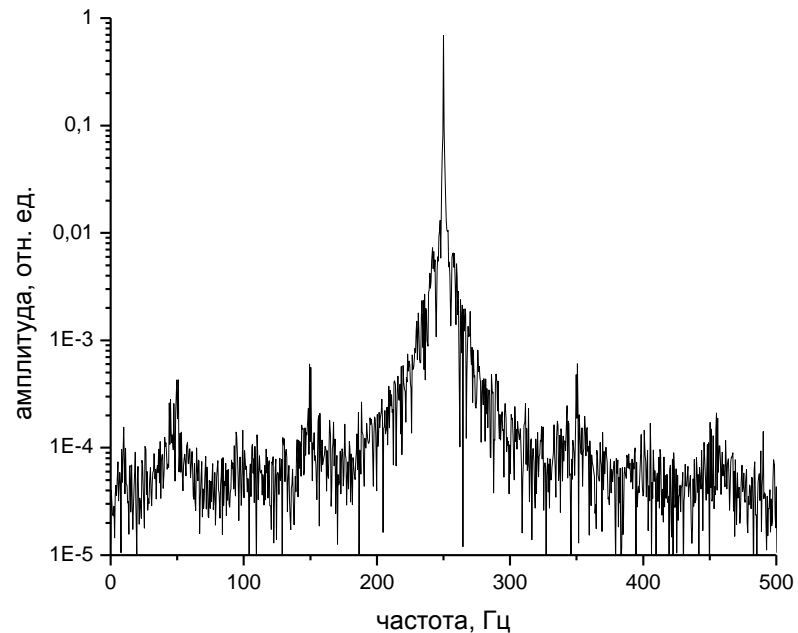
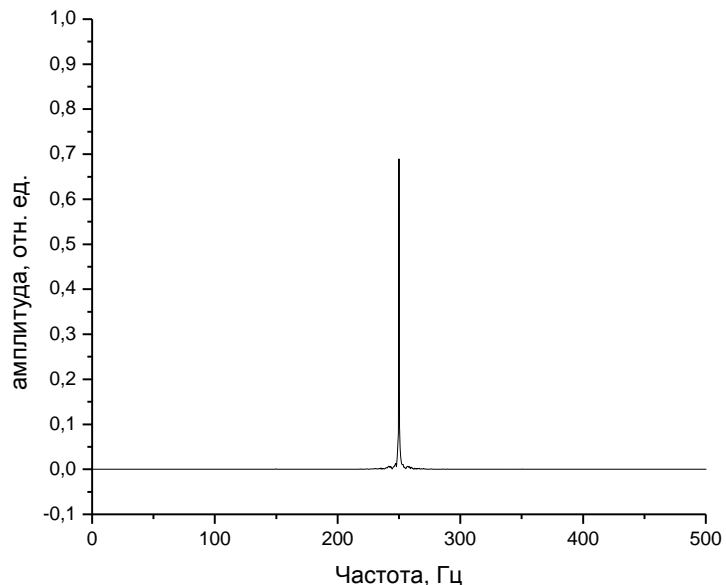
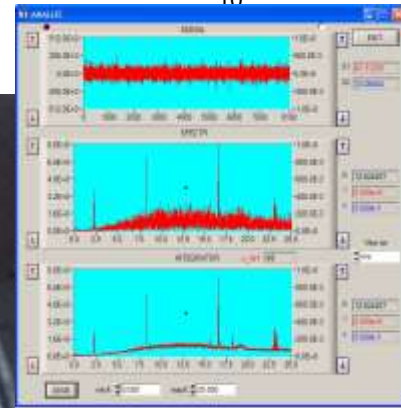
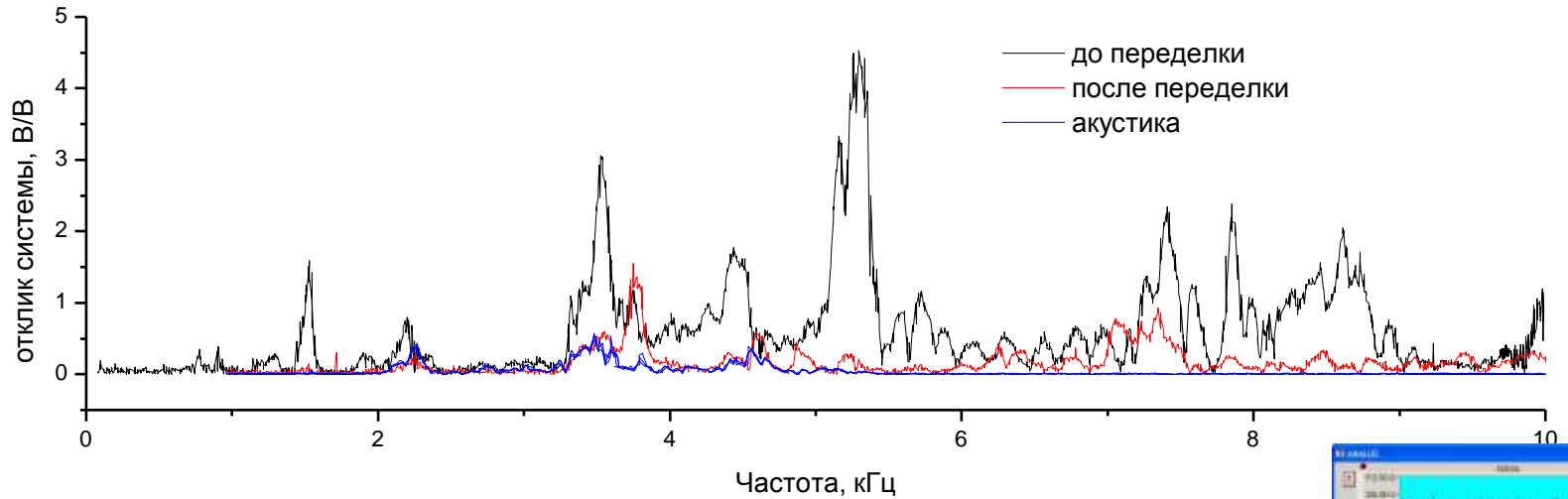


Figure 5. Reconstructed output spectrum of the DFB laser: (1) line profile of the master oscillator; (2) Lorentzian fit; (3) spectrum of the source with the amplifier switched on; (4) spectrum with the amplifier switched on, after digital filtration of the 100, 200 and 300 Hz mains harmonics.

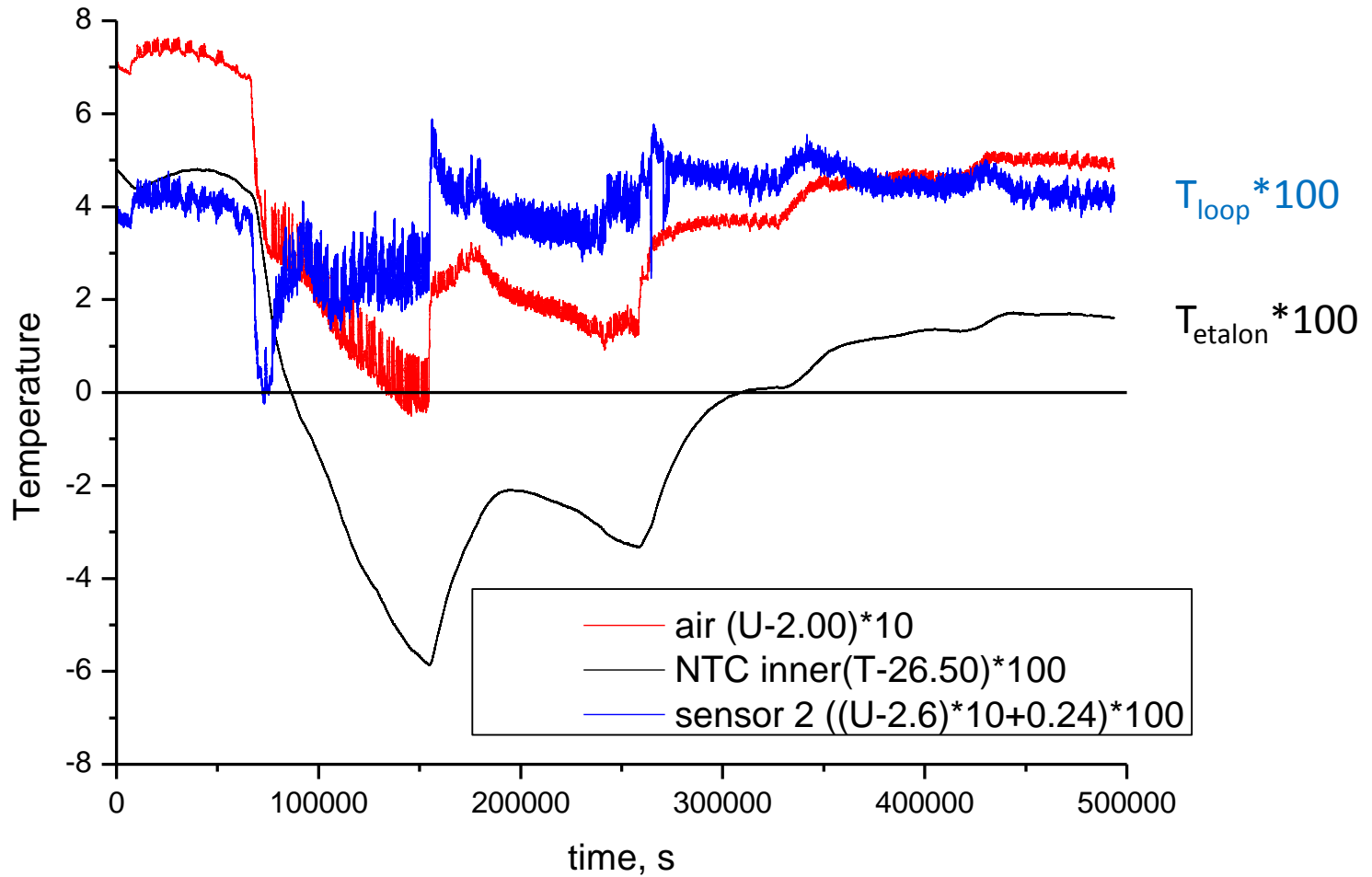
Результат обработки для $N=10000$, $bw=250$ Hz, $f_0=250$ Hz



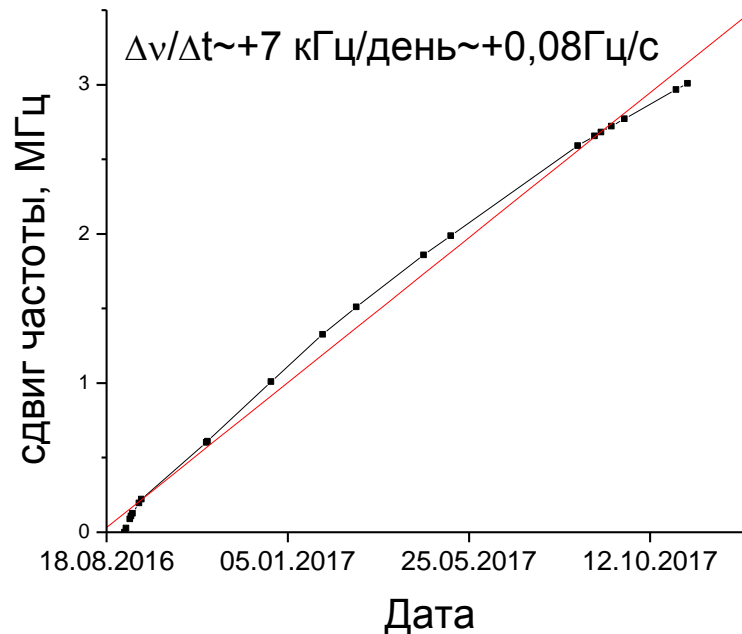
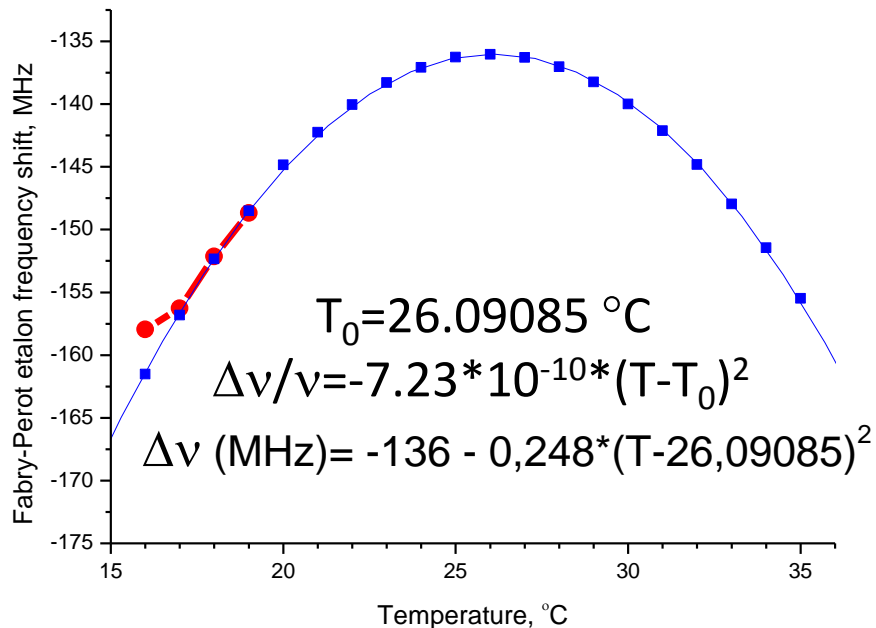
Улучшение пассивной стабильности лазера



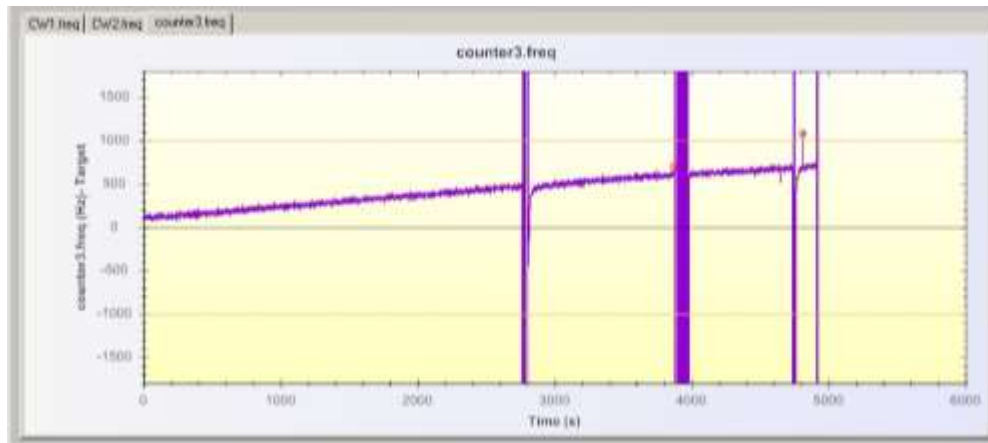
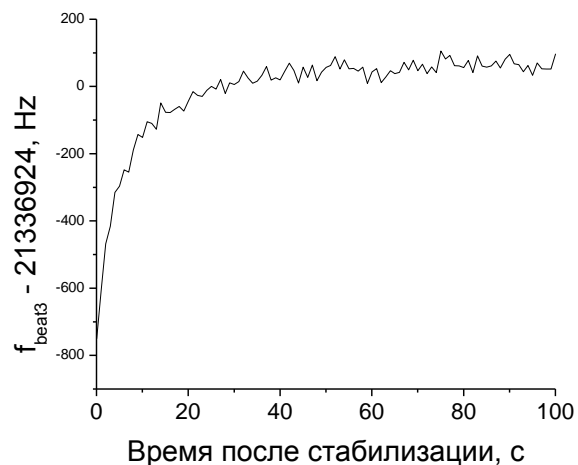
Температура в к.14 и эталона



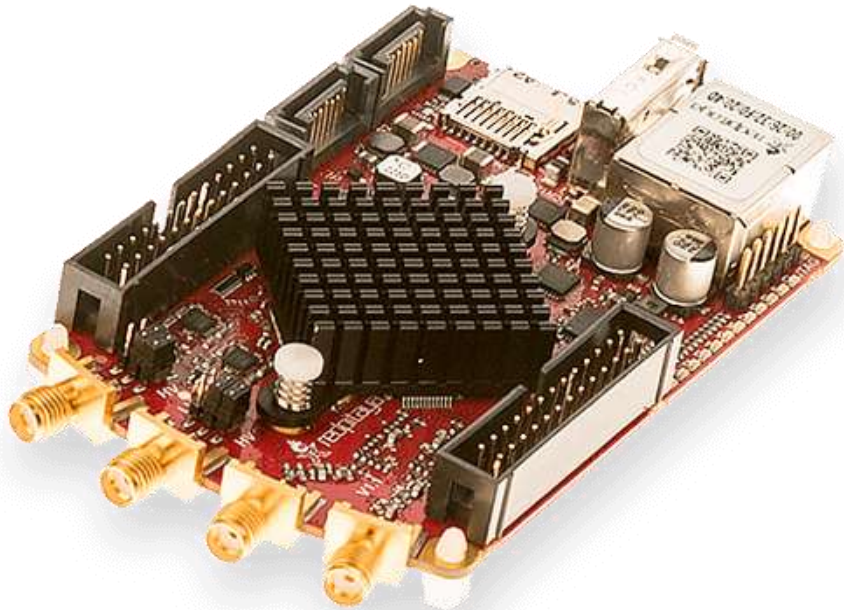
Характеристики эталона



$$\Delta\nu/\Delta t < +0.1 \text{ Гц/с}$$

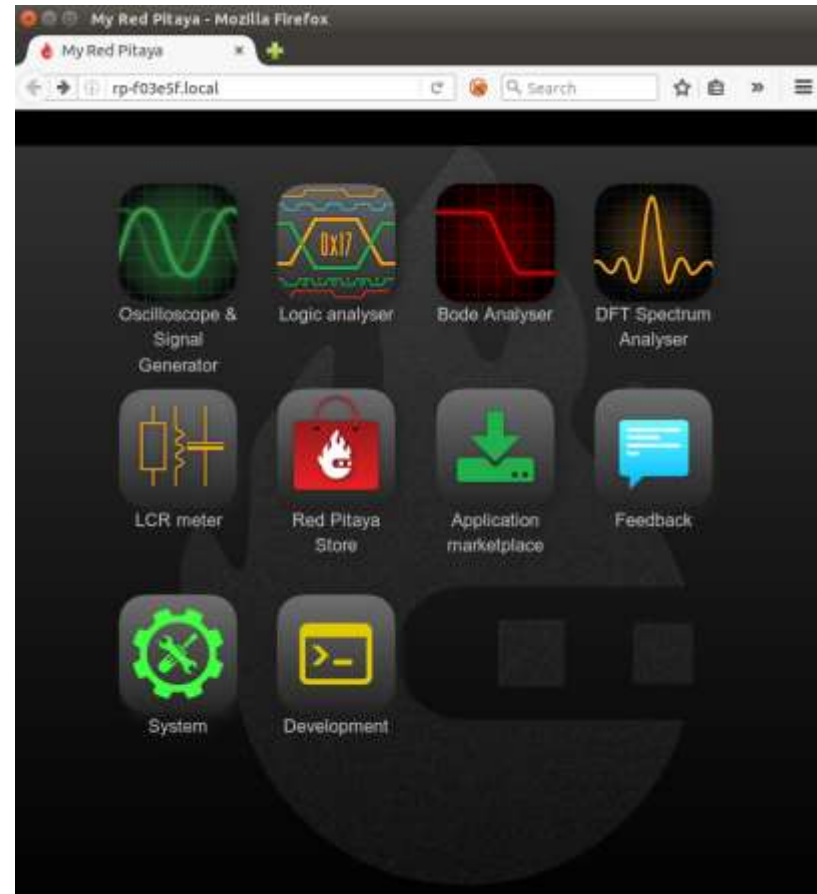


Перспективы



RedPitaya (€400)

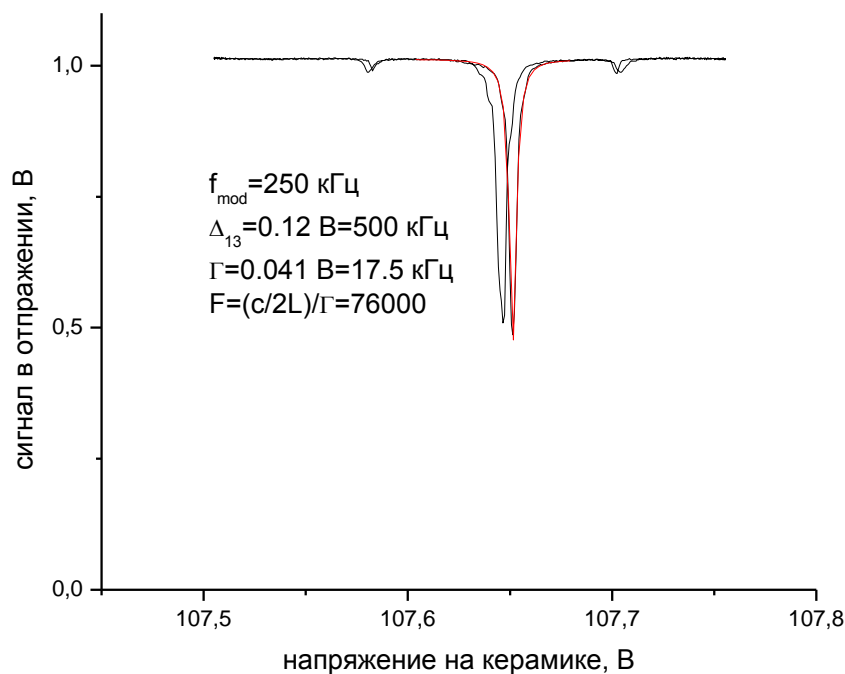
- 2ch 125 MSPS ADC, 14 bit
- 2ch 125 MSPS DAC, 14 bit
- Processor DUAL CORE ARM CORTEX A9
- FPGA Xilinx Zynq 7010 SOC Xilinx Zynq 7010 SOC



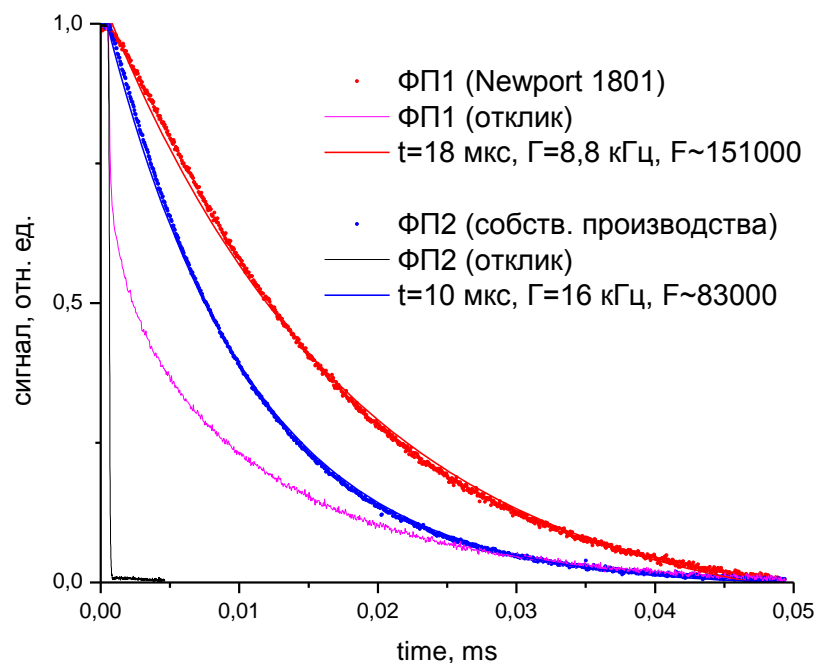
Перспективы

Зеркала отечественного производства 1030нм, $F \sim 80000$

сигнал в отраженном свете

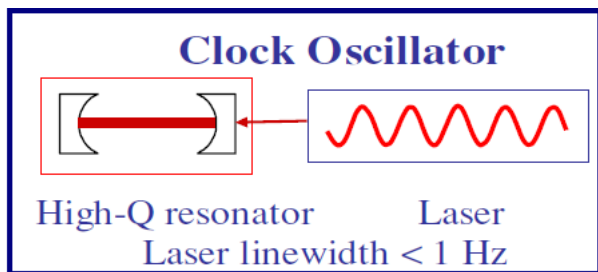


время жизни света в интерферометре

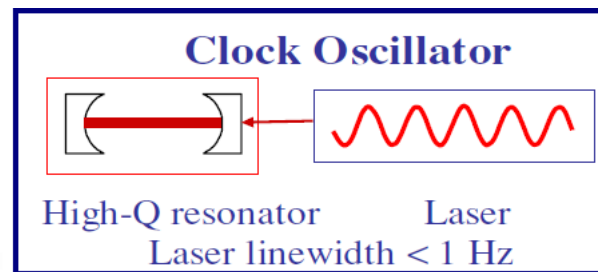


Перспективы

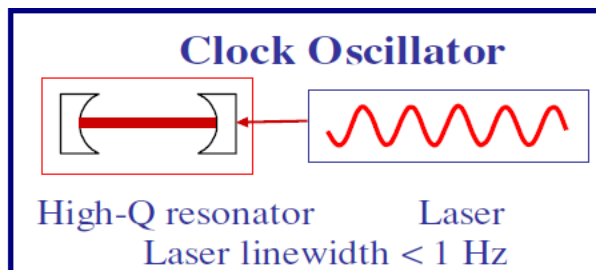
Mg (914 nm)



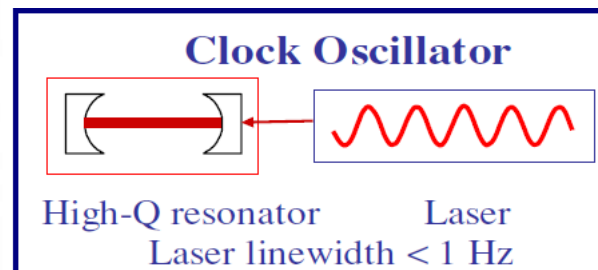
YbYAG/I₂ (1030 nm)



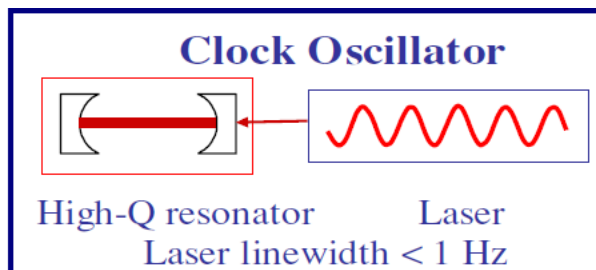
He-Ne/CH₄ (3390 nm)



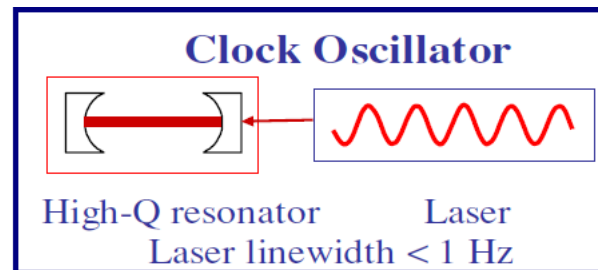
NdYAG/I₂ (1064 nm)



Yb⁺ (871 nm)



Yb⁺ (934 nm)





Спасибо за внимание!