

ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт
физико-технических и радиотехнических измерений»

СВЕРХМИНИАТЮРНЫЕ АТОМНЫЕ СТАНДАРТЫ ЧАСТОТЫ

Школа-Торий, МИФИ, 2019

С.М. ИГНАТОВИЧ¹, М.Н. СКВОРЦОВ¹, В.И. ВИШНЯКОВ¹,
Н.Л. КВАШНИН¹, В.А. ВАСИЛЬЕВ¹, Д.В. БРАЖНИКОВ^{1,2},
В.И. ЮДИН^{1,2,3}, А.В. ТААЙЧЕНАЧЕВ^{1,2}, С.Н. БАГАЕВ^{1,2},
И.Ю. БЛИНОВ⁴, В.Г. ПАЛЬЧИКОВ^{4,5}, Ю.С. САМОХВАЛОВ⁴,
Д.А. ПАРЁХИН⁴, Е.А. ЗОТОВ⁴, М.П. МАЛАХ⁴, С.М. КОБЦЕВ⁶,
В.А. ГАЙСМАН⁷

Организации

¹Институт лазерной физики СО РАН,
Новосибирск, Россия

²Новосибирский государственный университет,
Новосибирск, Россия

³Новосибирский государственный технический
университет, Новосибирск, Россия

⁴Всероссийский научно-исследовательский
институт физико-технических и
радиотехнических измерений, Менделеево,
Московская область, Россия

⁵Национальный исследовательский ядерный
университет МИФИ, Москва, Россия

⁶ООО «ТехноСкан», Новосибирск, Россия

⁷Институт физики полупроводников СО РАН,
Новосибирск, Россия

Содержание

- 1. Мотивация*
- 2. Актуальность*
- 3. Принцип действия КПН-
часов*
- 4. Функциональная схема*
- 5. Зарубежные аналоги*
- 6. Поглощающие ячейки*
- 7. Лазеры с вертикальным
резонатором*
- 8. Заключение и выводы*

- **Значительное внимание** ведущих стран мира уделяется разработке малогабаритных стандартов частоты, имеющих объём до нескольких десятков кубических сантиметров, с точностными характеристиками, сравнимыми с уже существующими цезиевыми, водородными и рубидиевыми стандартами частоты.
- **Задачи и цели** этих разработок направлены на повышение эффективности автономного навигационного обеспечения перспективных морских, наземных и воздушных военных образцов в условиях активного противодействия в радиотехническом и оптическом диапазонах электромагнитного спектра.
- **Создание малогабаритного высокостабильного квантового стандарта частоты** позволит реализовать в большем объеме в прецизионной аппаратуре потребителей ГЛОНАСС потенциальные точности этой системы.

Применения:

- спутниковые навигационные системы в условиях существенных динамических и помеховых воздействий;
- спутниковые навигационные системы в условиях затенений и ухудшения видимости навигационных космических аппаратов;
- инерциальные системы навигации (навигации без спутников).

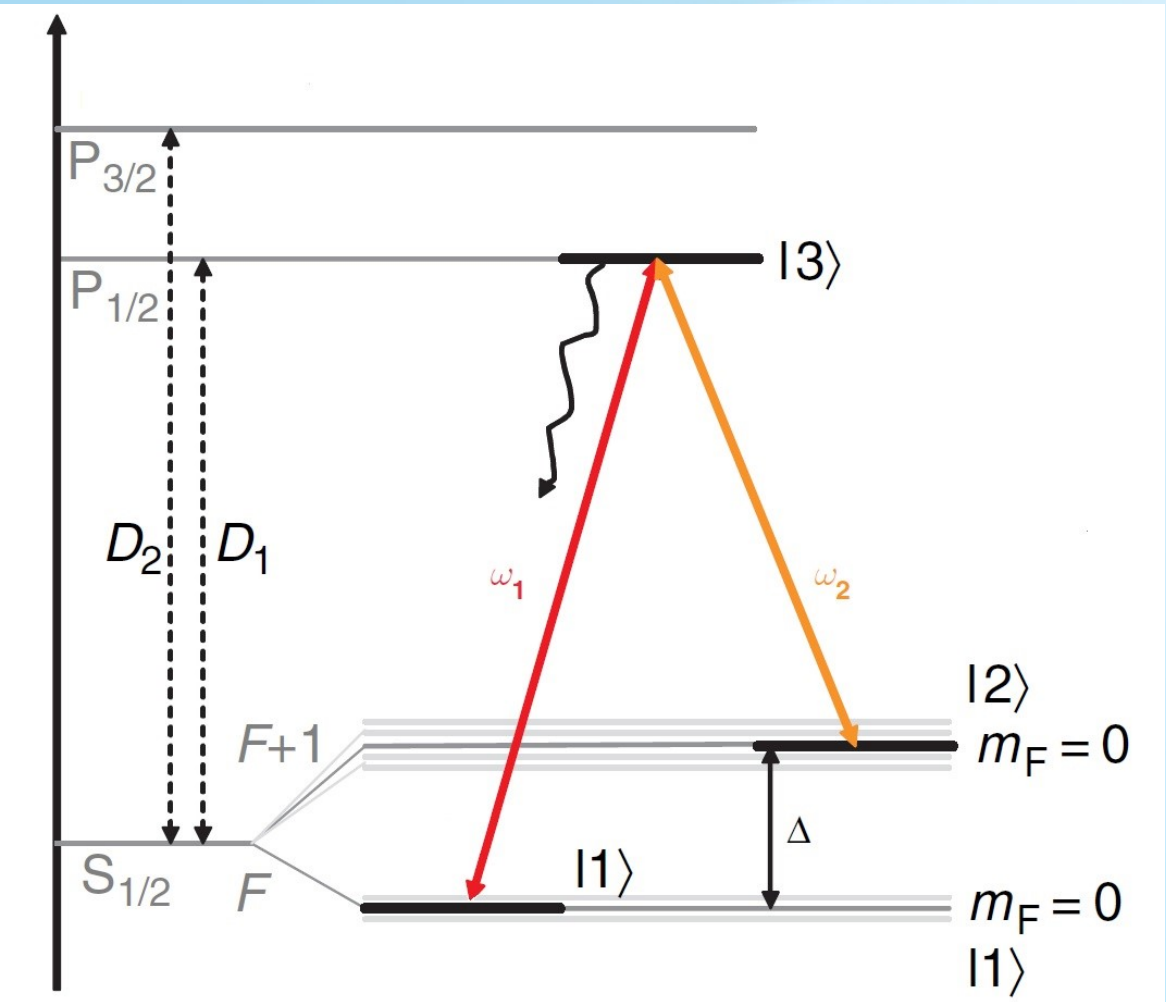
Также возможно использование:

- для синхронизации оборудования и передачи данных в высокоскоростных вычислительных сетях;
- в системах связи, включая широкополосную связь с быстрым переключением несущей и спектральным уплотнением каналов, повышение помехозащищенности аппаратуры и создание устойчивых беспроводных каналов передачи данных.

Наиболее перспективным вариантом малогабаритного высокостабильного квантового стандарта частоты является стандарт частоты на основе эффекта когерентного пленения населенностей (КПН). Сравнение параметров коммерчески доступных малогабаритных стандартов частоты приведены в таблице.

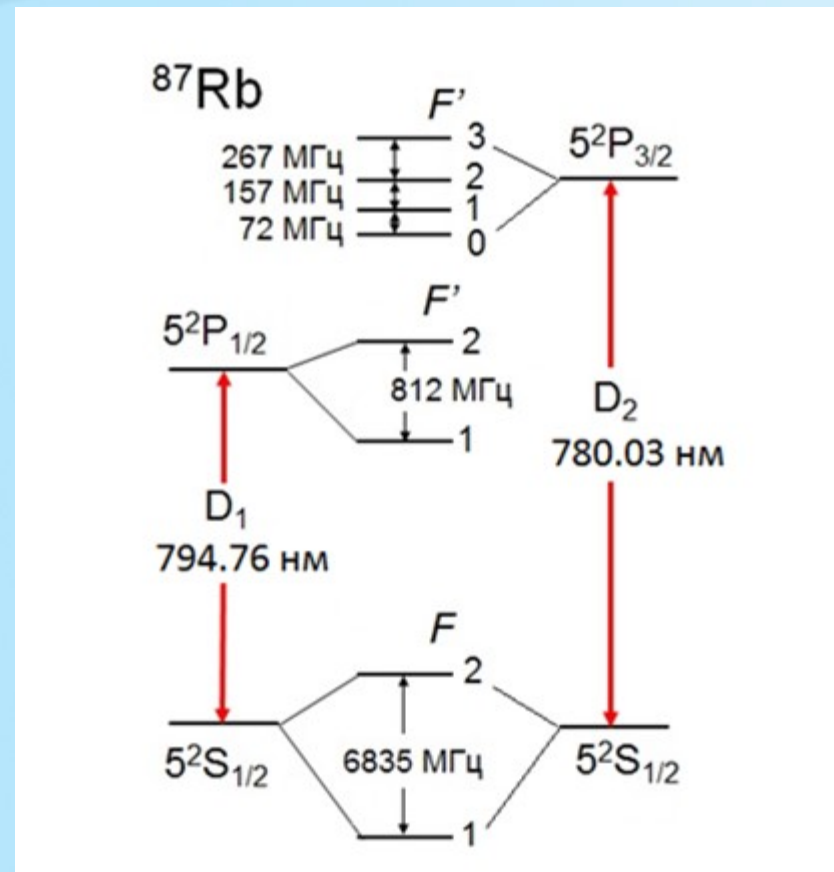
Параметр	Прецизионные термостатированные кварцевые генераторы	Малогабаритные атомные стандарты частоты СВЧ диапазона	Стандарты частоты на основе КПН
Пример	«Морион» ГК-118-ТС	«Рукнар» Ч1-1022	«Microsemi» Quantum LN CSAC
Габариты, см ³	4	366	50
Вес, г	<10	600	75
Энергопотребление, Вт	1-2	16	<0.3
Кратковременная нестабильность частоты, за 1 с.	10^{-10}	10^{-11}	10^{-11}
Долговременная нестабильность частоты, за 1 сутки	10^{-9}	10^{-12}	10^{-12}

Стандарт частоты на основе КПН



Энергетическая диаграмма
КПН-эффекта

Сверхтонкая структура атомов рубидия



Сверхтонкая структура атомов рубидия

Таблица 1. Характеристики сверхтонкой структура основного состояния изотопов ^{85}Rb и ^{87}Rb

Изотоп	Распространенность, %	Спин ядра	Магнитный момент ядра, μ_N	Сверхтонкое расщепление, МГц	Константы расщепления возбужденных состояний		
					A_J		$B_{3/2}$
					J=1/2	J=3/2	
^{85}Rb	72.2	5/2	1.35	3035.732	121	25.0	26.0
^{87}Rb	27.8	3/2	2.75	6834.683	406	84.9	12.6

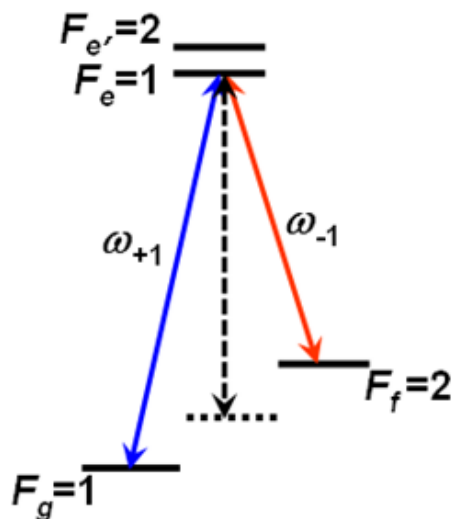
Резонансное излучение на двух переходах $F_g \leftrightarrow F_e$ и $F_f \leftrightarrow F_e$ формируется модуляцией тока инжекции диодного лазера, генерирующего на частоте $\omega_0 = 0.5(\omega_{eg} + \omega_{ef})$ СВЧ сигналом $i_{rf} \sim \sin(\omega_{rf}t)$, где $\omega_{rf} \approx 0.5\omega_{ef}$. Результирующая напряженность электрического поля трех гармоник имеет вид

$$\mathbf{E}(t) = E_0 \operatorname{Re}[\mathbf{e}_0 \exp(-i\omega_0 t - i\varphi_0)] + \sum_{m=\pm} E_m \operatorname{Re}[\mathbf{e}_m \exp(-i\omega_m t - i\varphi_m)] \quad (1)$$

где φ_m – фазы боковых частот $\omega_{\pm} = \omega_0 \pm \omega_{rf}$. Отношение амплитуд боковых частот E_{\pm} и основной частоты E_0 определяется коэффициентом модуляции.

Таблица 2. Спектроскопические характеристики переходов в атоме ^{87}Rb .

Переход	Радиационная вероятность		Сила осцилляторов	Время жизни, нс	Доплеровская ширина, МГц
	10^{-8} c^{-1}	МГц			
$5^2S_{1/2} - 5^2P_{1/2} (\text{D}_1)$	0.34	5.41	0.32	28.5	310
$5^2S_{1/2} - 5^2P_{3/2} (\text{D}_1)$	0.37	5.89	0.67	26.5	320



Сверхтонкая структура атомов рубидия

Таблица 1. Характеристики сверхтонкой структура основного состояния изотопов ^{85}Rb и ^{87}Rb

Изотоп	Распространенность, %	Спин ядра	Магнитный момент ядра, μ_N	Сверхтонкое расщепление, МГц	Константы расщепления возбужденных состояний		
					A_J		$B_{3/2}$
					J=1/2	J=3/2	
^{85}Rb	72.2	5/2	1.35	3035.732	121	25.0	26.0
^{87}Rb	27.8	3/2	2.75	6834.683	406	84.9	12.6

Основные уравнения

$$i\hbar \frac{\partial \Psi}{\partial t} = \left[H_0 - \mathbf{D} \cdot \mathbf{E}(t) + \frac{e}{mc} \mathbf{P} \cdot \mathbf{A} \right] \Psi, \quad (2)$$

где $H_0 = H_a + H_{\text{rad}}$ – гамильтониан свободного атома H_a и квантованного поля излучения $H_{\text{rad}} = \sum_{\lambda} \int d\mathbf{k} a_{\mathbf{k}\lambda}^{\dagger} a_{\mathbf{k}\lambda}$, \mathbf{k} – волновой вектор фотона, λ – его спиральность, $a_{\mathbf{k}\lambda}^{\dagger}$ ($a_{\mathbf{k}\lambda}$) – оператор рождения (уничтожения) фотона в моде $\mathbf{k}\lambda$, \mathbf{D} – оператор дипольного момента атома, \mathbf{P} – оператор полного импульса электронов, \mathbf{A} – оператор векторного потенциала квантованного поля в длинноволновом приближении (при $t=0$):

$$\mathbf{A} = \frac{\sqrt{\hbar c}}{2\pi} \sum_{\lambda} \int \frac{d\mathbf{k}}{\sqrt{k}} (\mathbf{e}_{\mathbf{k}\lambda} a_{\mathbf{k}\lambda} + \mathbf{e}_{\mathbf{k}\lambda}^* a_{\mathbf{k}\lambda}^{\dagger}). \quad (3)$$

В уравнении (2) удобно перейти к представлению взаимодействия $\Psi = \exp(-H_0 t) \Psi'$:

$$i\hbar \frac{\partial \Psi'}{\partial t} = \left[-\mathbf{D}'(t) \cdot \mathbf{E}(t) + \frac{e}{mc} \mathbf{P}'(t) \cdot \mathbf{A}'(t) \right] \Psi', \quad (4)$$

где соответствующие операторы в представлении взаимодействия имеют вид:

$$\begin{aligned} \mathbf{D}'(t) &= \exp(iH_a t / \hbar) \mathbf{D} \exp(-iH_a t / \hbar), \\ \mathbf{P}'(t) &= \exp(iH_a t / \hbar) \mathbf{P} \exp(-iH_a t / \hbar), \end{aligned} \quad (5)$$

$$\mathbf{A}'(t) = \frac{\sqrt{\hbar c}}{2\pi} \sum_{\lambda} \int \frac{d\mathbf{k}}{\sqrt{k}} (\mathbf{e}_{\mathbf{k}\lambda} a_{\mathbf{k}\lambda} \exp(-i\omega t) + \mathbf{e}_{\mathbf{k}\lambda}^* a_{\mathbf{k}\lambda}^{\dagger} \exp(i\omega t)). \quad (6)$$

Приближенное решение уравнения (4) можно искать в виде разложения по произведениям собственных функций атома Φ_n и квантованного поля

$$\Psi'(t) = \sum_n c_{n,0}(t) \Phi_n |0\rangle + \sum_n \sum_{\lambda} \int c_{n,\mathbf{k}\lambda}(t) \Phi_n |\mathbf{k}\lambda\rangle d\mathbf{k}, \quad (7)$$

где $|0\rangle$ – вакуумное состояние поля, $|\mathbf{k}\lambda\rangle = a_{\mathbf{k}\lambda}^{\dagger} |0\rangle$ – состояние фотона в моде $\mathbf{k}\lambda$.

Схема переходов

Разрешенные переходы для правой ($\Delta M=+1$) и левой ($\Delta M=-1$) круговых компонент поля в Λ -системе $F_g=1 \leftrightarrow F_e=1 \leftrightarrow F_f=2$ показаны на рис. 4.

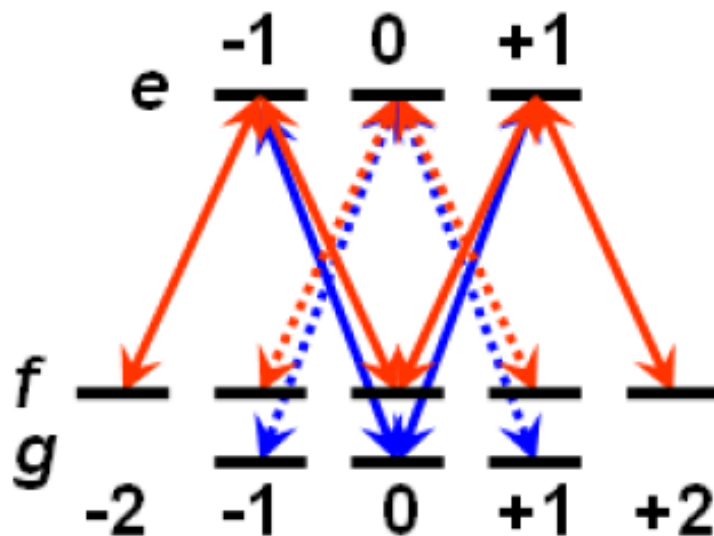
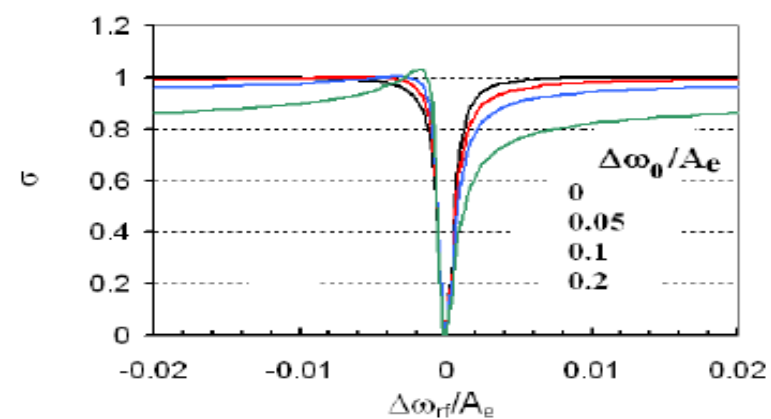


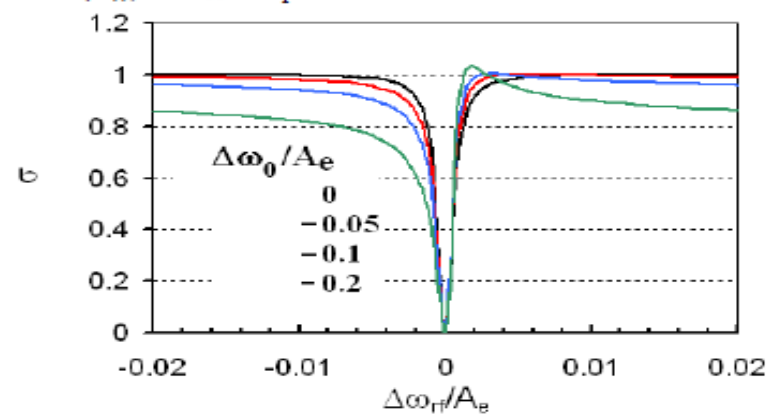
Рисунок 4 – Схема переходов между магнитными подуровнями сверхтонких уровней в атоме ^{87}Rb в эллиптически поляризованном бихроматическом поле.

Схема переходов



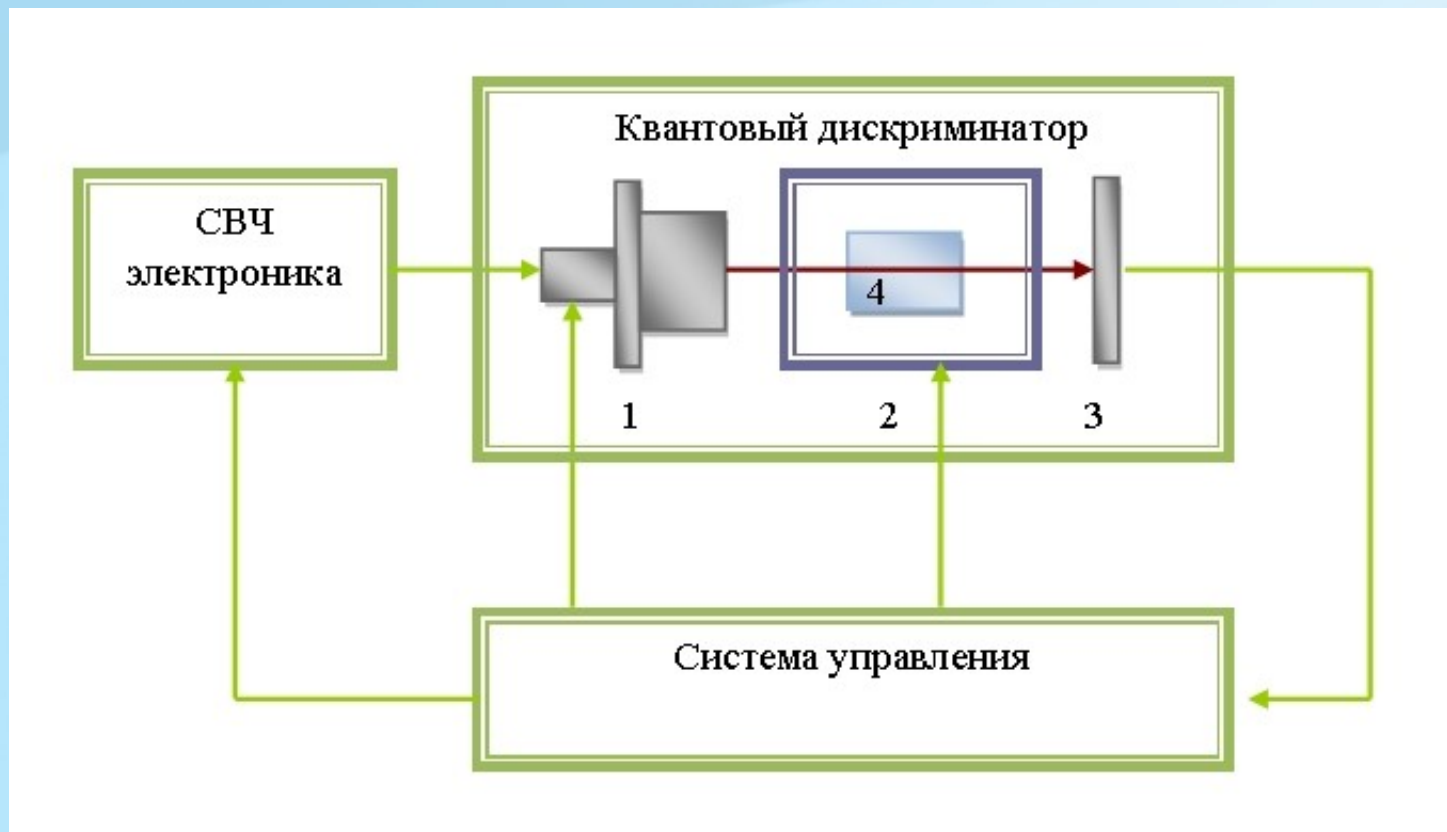
Контур линии КПН-резонанса в зависимости от частоты модулирующего СВЧ генератора. Кривые соответствуют разным значениям лазерной частоты. Интенсивность поля соответствует $2\Omega/A_e=0.1$.

Результаты расчета показывают, что положение КПН-резонанса не зависит от частоты лазерного излучения. Однако при увеличении $\Delta\omega_0 = \omega_0 - \omega_g + \omega_g/2$ растет ширина линии поглощения и ее асимметрия. Также уменьшается средний уровень сигнала. При отрицательных $\Delta\omega_0$ зеркально меняется асимметрия узкого резонанса (знак Φ в выражении (41)), как видно из рис. 18.



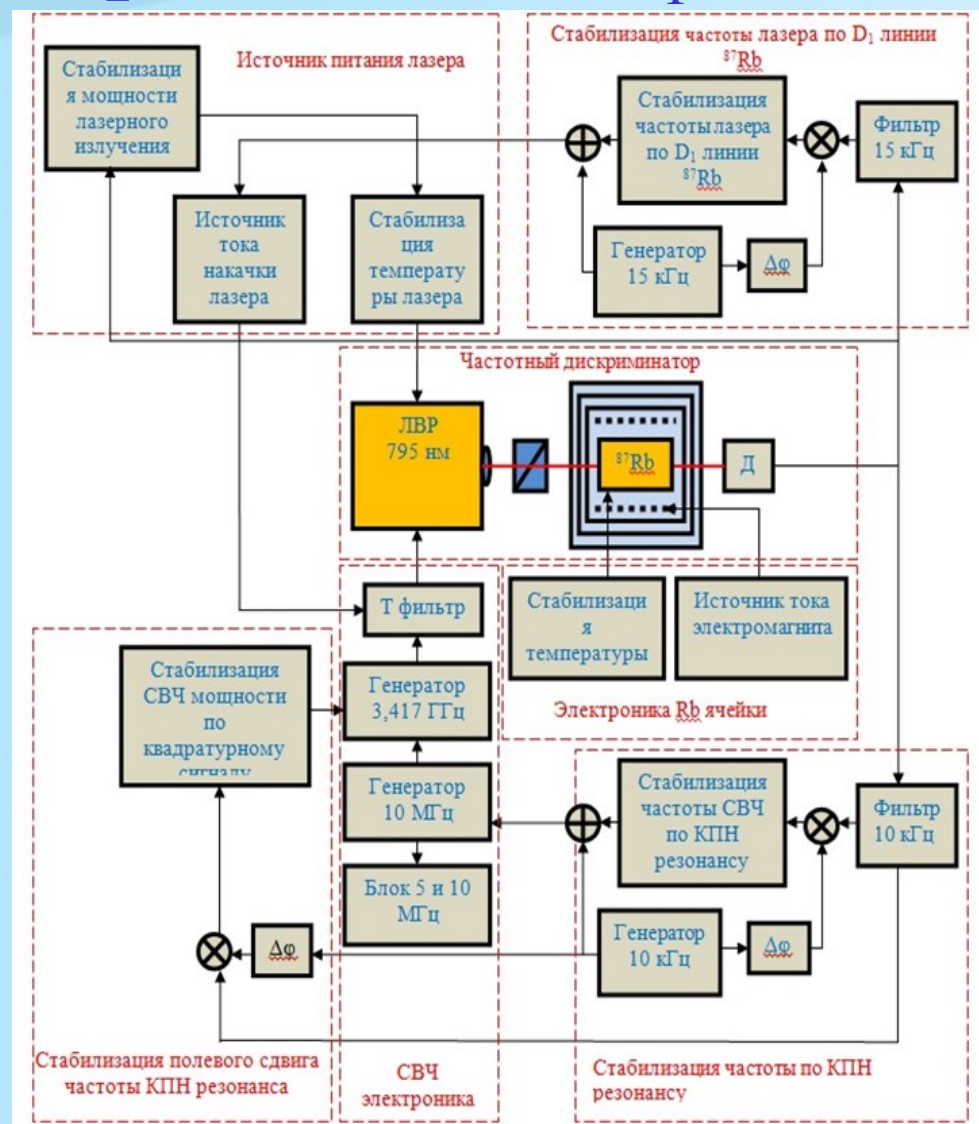
То же, что на рис. 18, но для отрицательных $\Delta\omega_0$.

Стандарт частоты на основе КПН



Блок-схема стандарта частоты на основе КПН:
1 – VCSEL лазер; 2 – система термостабилизации газовой ячейки;
3 – фотодiod; 4 – газовая ячейка.

Структурная схема НАП-КПН на основе КПН резонансов D₁ линии ⁸⁷Rb



Стандарт частоты на основе КПН

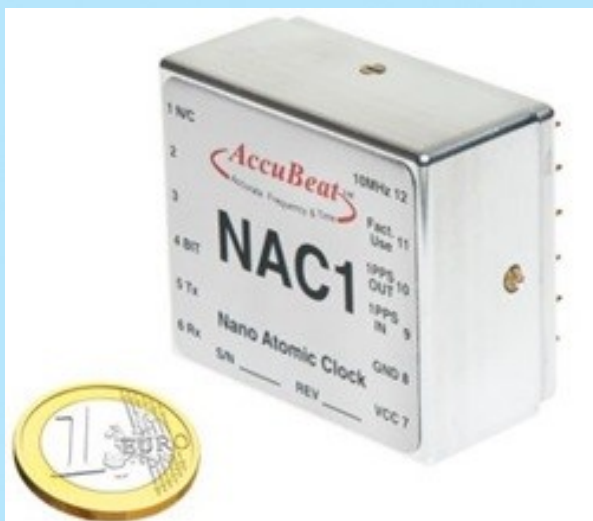
Достоинства:

- низкая кратковременная нестабильность (составляет 10^{-11} за 1 с.);
- низкая долговременная нестабильность (порядка 10^{-12} за 1 сутки);
- возможность радикального уменьшения габаритов всего стандарта (менее 50 см^3), а также достижения низкого энергопотребления (менее 300 мВт), поскольку отпадает необходимость в громоздком СВЧ резонаторе, а также применению сверхминиатюрных MEMS газовых ячеек и VCSEL-лазеров.

Стандарт частоты на основе КПН

- Разработка стандарта частоты на основе КПН осуществляется в ряде стран и количество фирм, участвовавших на разных стадиях программ достаточно велико. Но до коммерческого результата доведены разработки фирмы Microsemi (США) и Accubeat (Израиль).
- В настоящее время ФГУП «ВНИИФТРИ» в рамках федеральной целевой программы «Поддержание, развитие и использование системы ГЛОНАСС на 2012-2020 годы» выполняет ОКР «Создание сверхминиатюрного квантового стандарта частоты для прецизионной аппаратуры потребителей системы ГЛОНАСС» (шифр «НАП-КПН»), заказчик Министерство промышленности и торговли Российской Федерации. В соответствии с требованиями госконтракта разрабатывается стандарт частоты на основе КПН.

Сравнение изделия ФГУП «ВНИИФТРИ» с коммерчески доступными аналогами



«Accubeat»
NAC1



«Microsemi»
Quantum LN CSAC



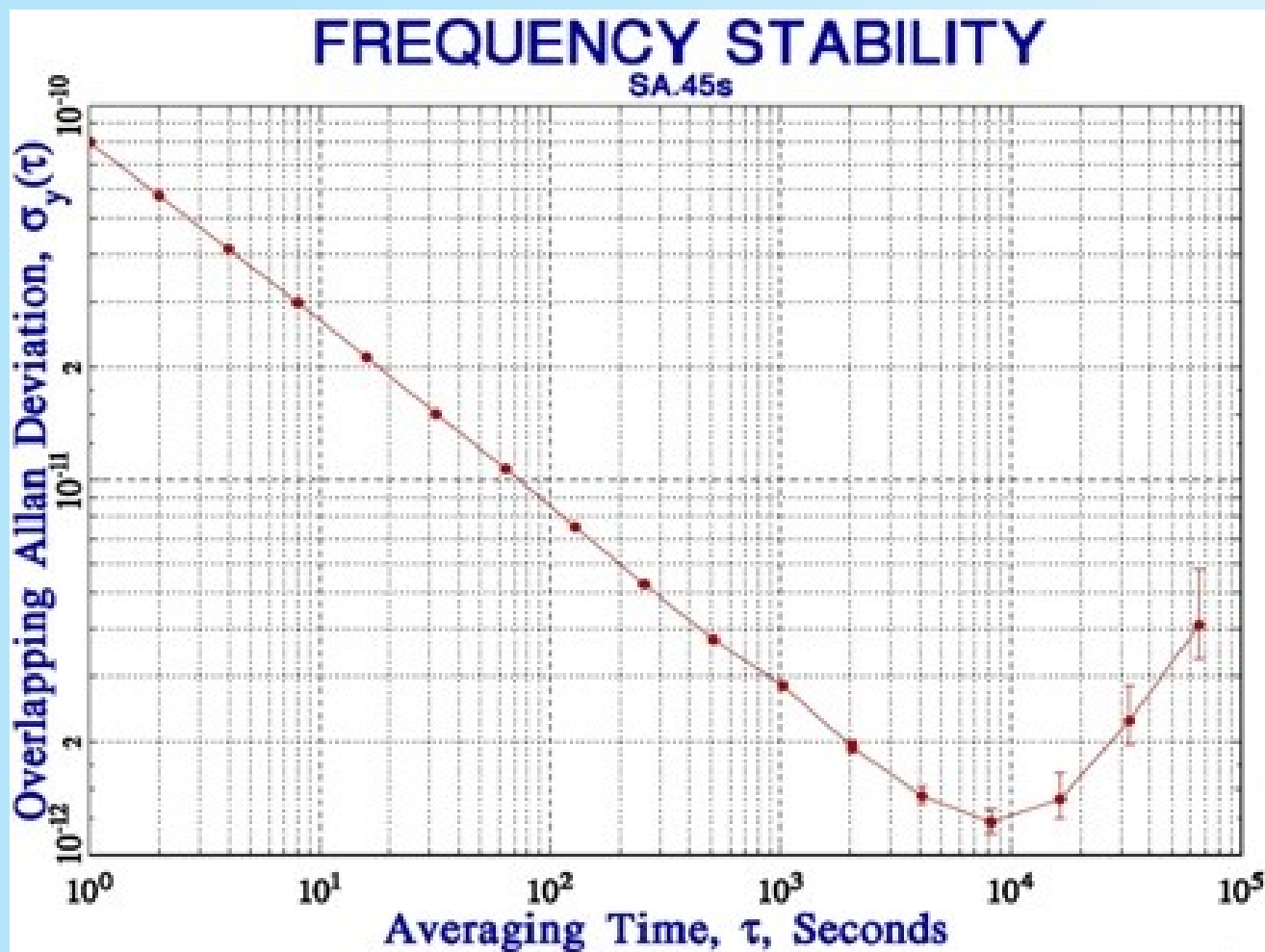
Изделие
ФГУП «ВНИИФТРИ»

Компактные атомные часы на основе эффекта когерентного пленения населенностей (КПН-эффект)

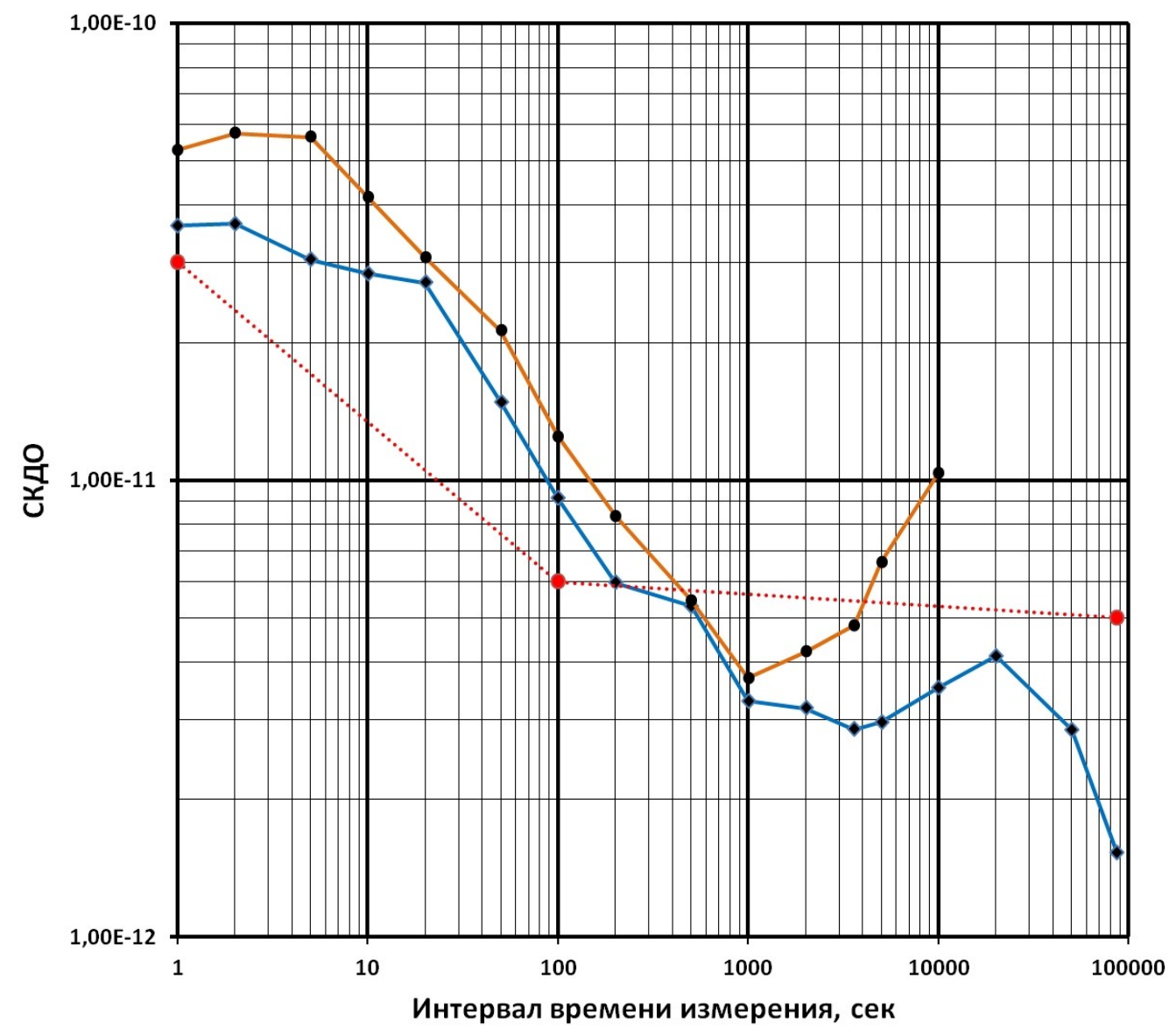


Компания Bathys Hawaii разработала и создала первые в мире наручные атомные часы. Как становится ясно из названия, в Bathys Cesium 133 используется цезий-133, который позволяет добиться высокой точности, так что часы имеют погрешность в 1 секунду на 1000 лет. Цена устройства составляет \$12000.

Нестабильность (девиация Аллана) атомных цезиевых КРН-часов “SA.45s” от Microsemi Corp.



Результаты предварительных измерений СКДО изделия ФГУП «ВНИИФТРИ»



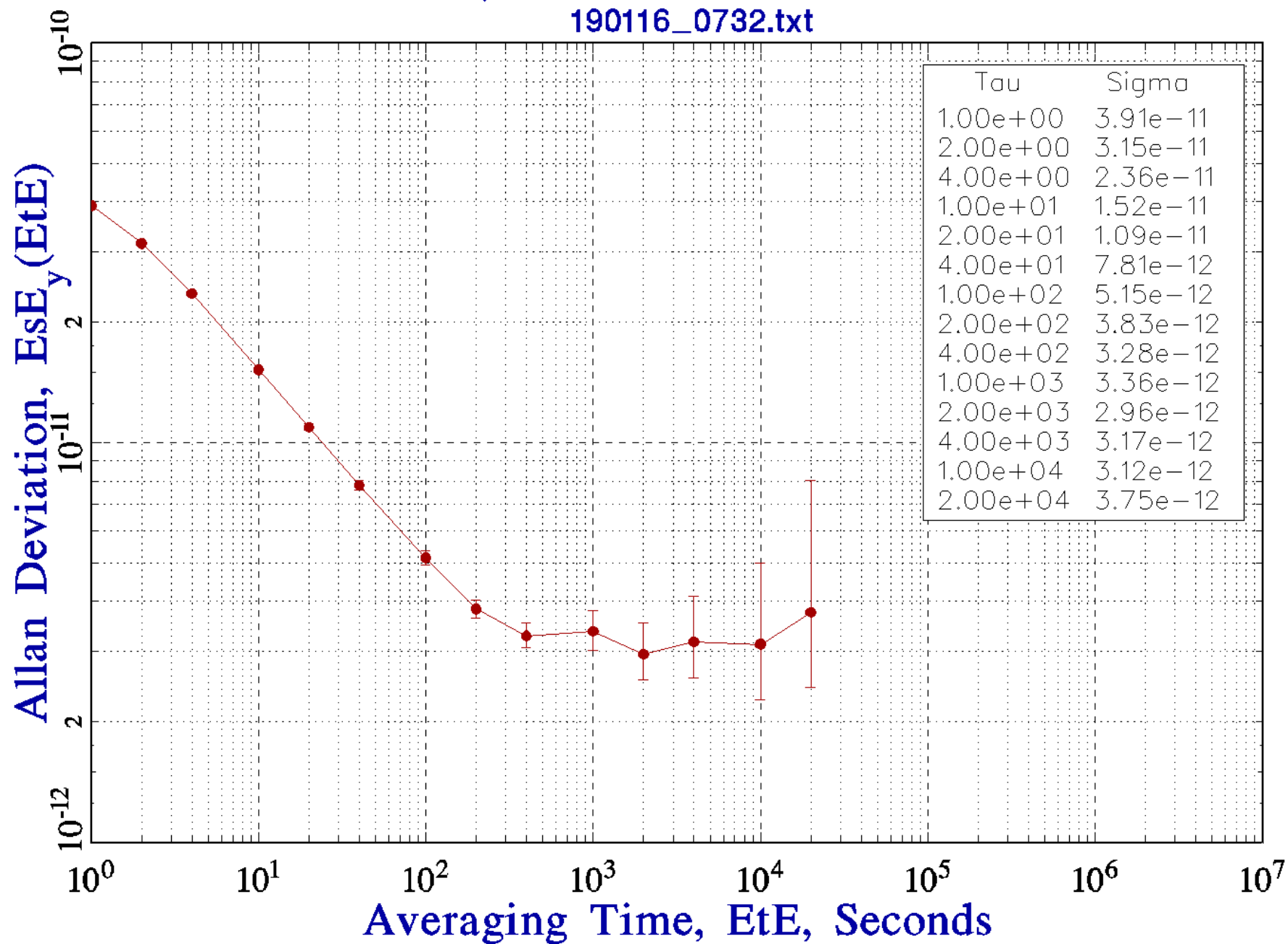
Красный цвет – требования ТЗ.

Оранжевый цвет – измерения СКДО без включения режима стабилизации оптической мощности излучающего лазера.

Синий цвет - измерения СКДО с включением режима стабилизации оптической мощности излучающего лазера.

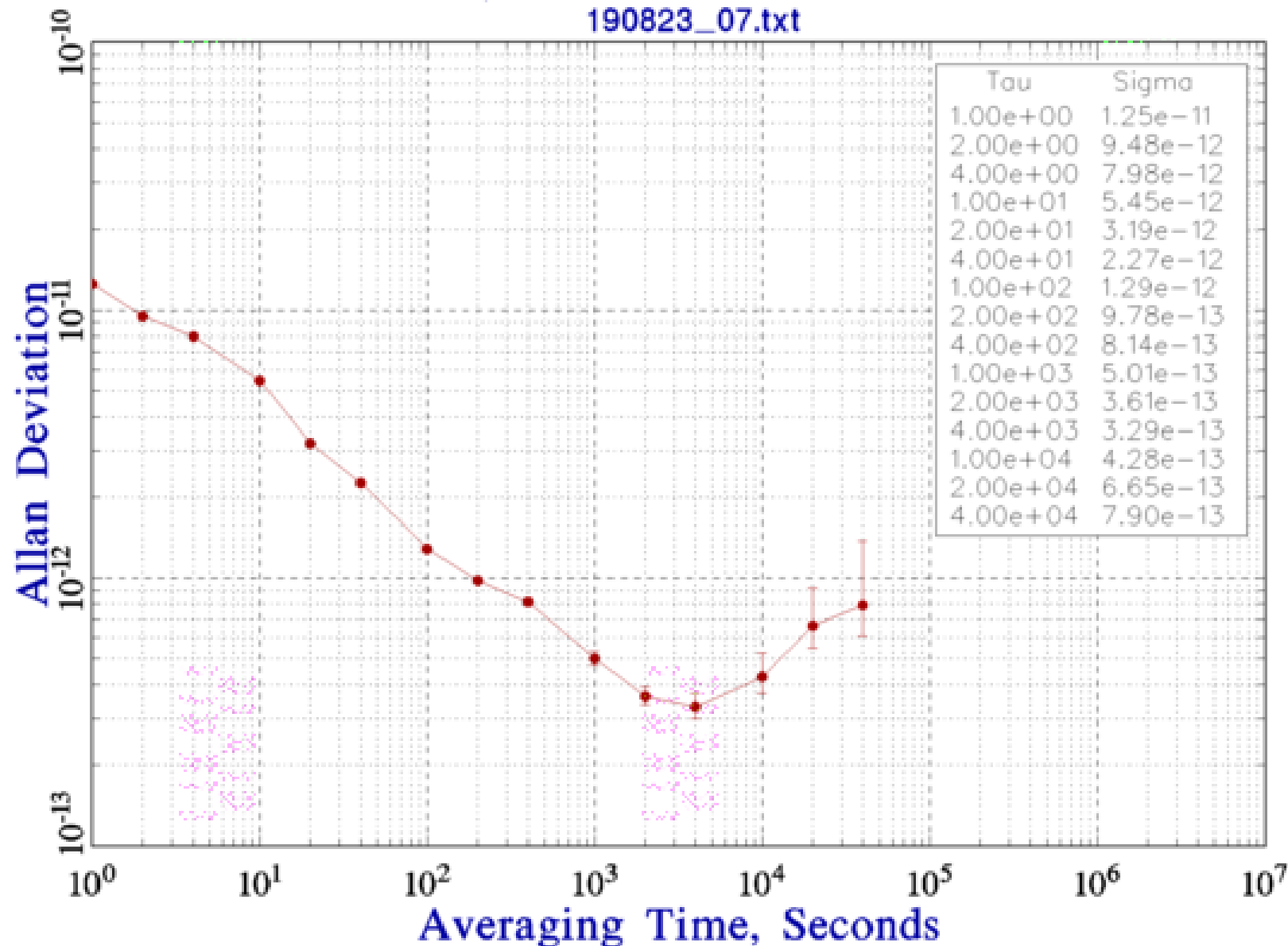
FREQUENCY STABILITY

190116_0732.txt



FREQUENCY STABILITY

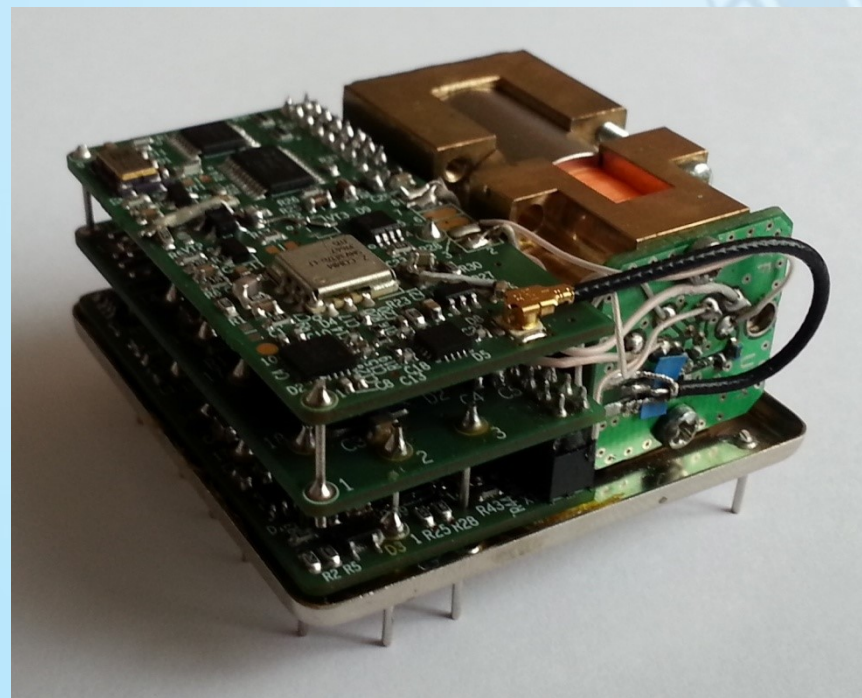
190823_07.txt



Сравнение изделия ФГУП «ВНИИФТРИ» с коммерчески доступными аналогами



«Microsemi»
SA.31m

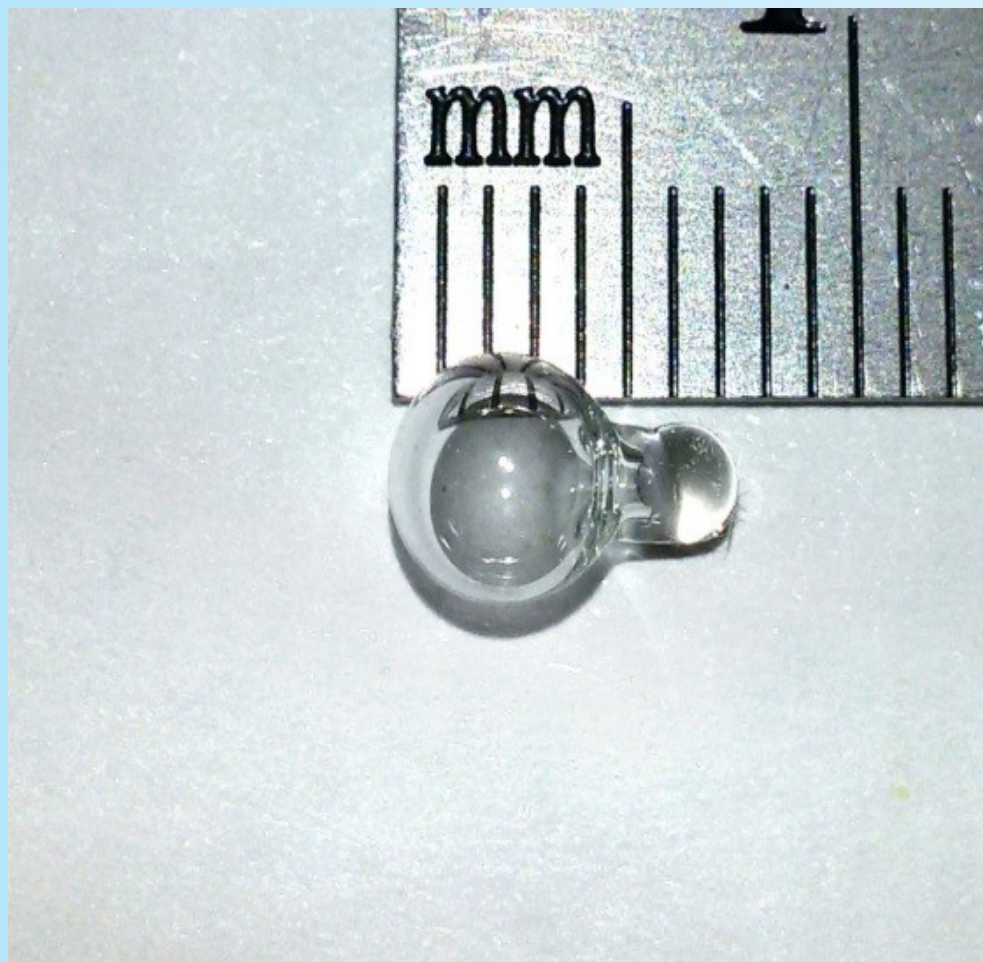


Изделие
ФГУП «ВНИИФТРИ»

Сравнение изделия ФГУП «ВНИИФТРИ» с коммерчески доступными аналогами

Параметр	Стандарты частоты на основе КПН		
	«Accubeat» NAC1	«Microsemi» Quantum LN CSAC	Изделие ФГУП «ВНИИФТРИ»
Страна производитель	Израиль	США	РФ
Габариты, см ³	32	50	60
Энергопотребление, Вт	1,2	<0,3	0,3
Рабочий диапазон температур, °С	от -20 до +65	от -10 до +35	от -60 до +60
Кратковременная нестабильность частоты, за 1 с.	10 ⁻¹⁰	10 ⁻¹¹	10 ⁻¹¹
Долговременная нестабильность частоты, за 1 сутки	10 ⁻¹¹	10 ⁻¹²	10 ⁻¹²

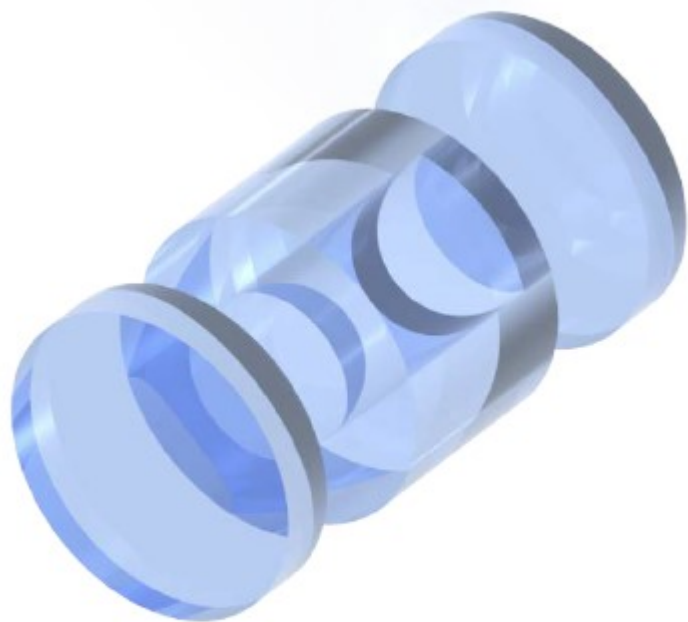
Фотография поглощающей ячейки с буферным газом



Фотография поглощающей ячейки с парафиновым покрытием



МЭМС-технологии для поглощающей ячейки, изготовленной из кварца



а



б

1. Cold-technology-based vapour cell: а) 3D модель элементов ячейки перед сборкой, б) фотография изготовленной ячейки.

Изготовленные пробные партии рубидиевых ячеек по МЭМС технологии:
фотографии первых пяти серий



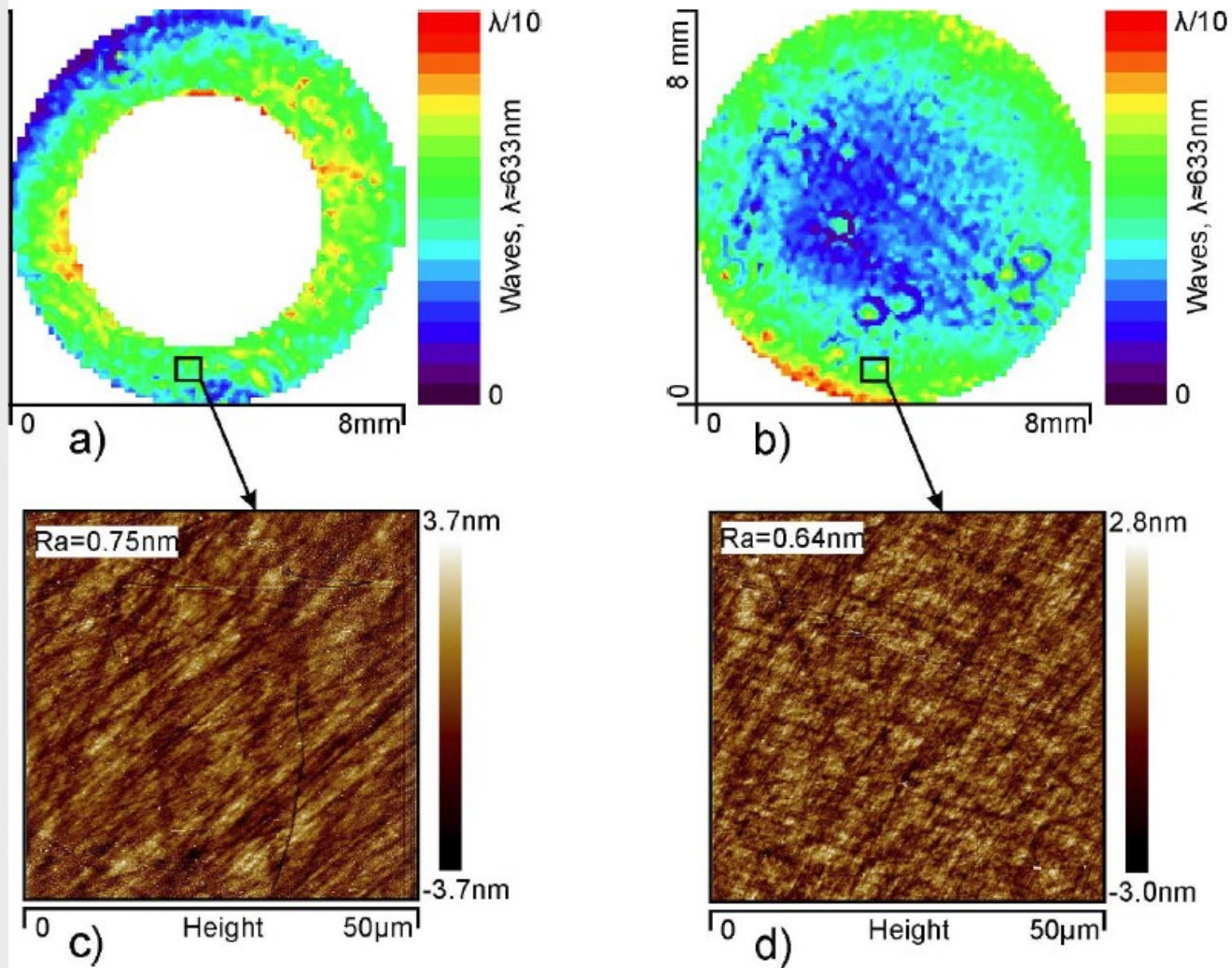
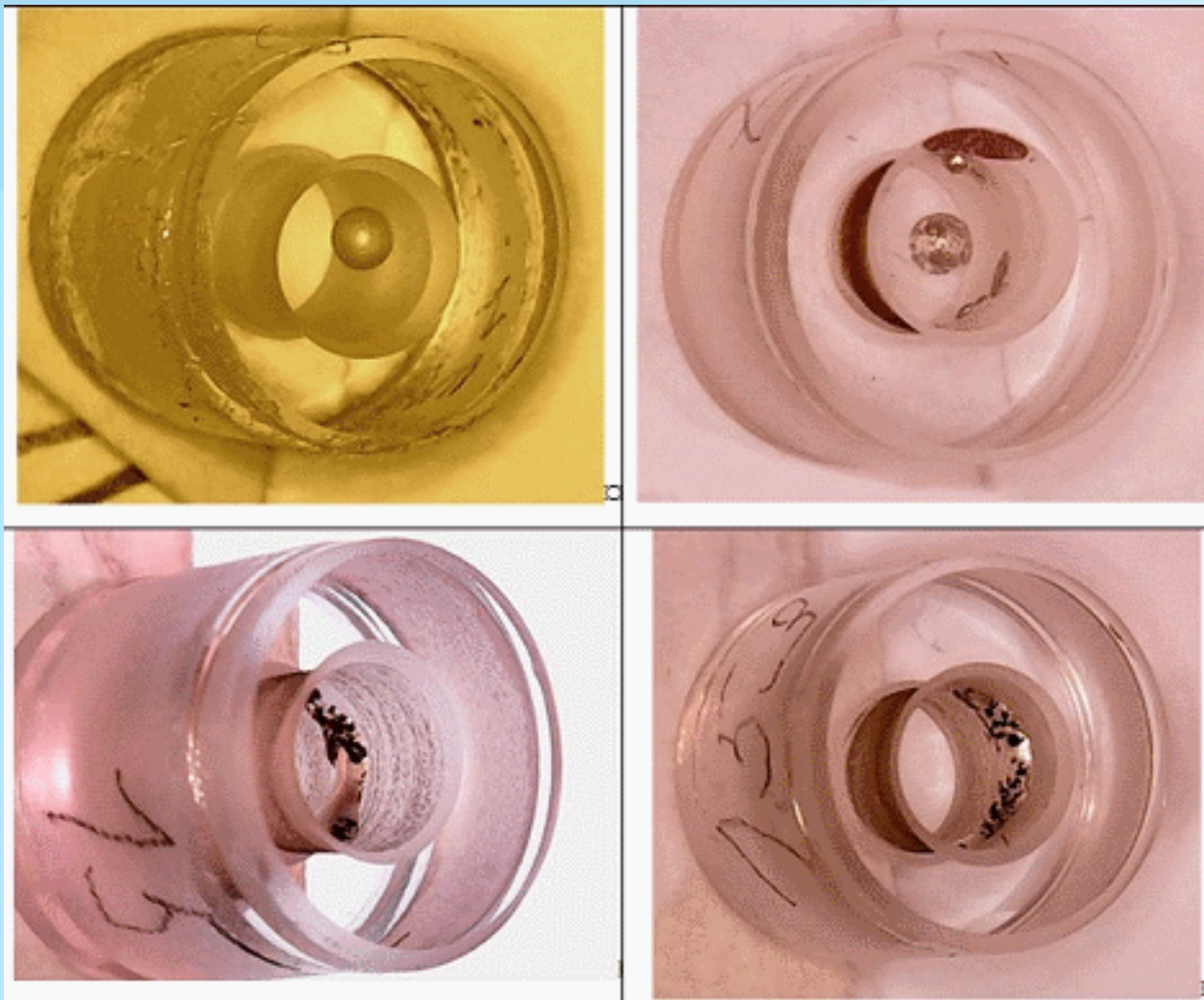


Рис. 2: a), c) поверхность центральной детали ячейки (торец цилиндра); b), d) – поверхность окна ячейки.

Рубидиевые ячейки

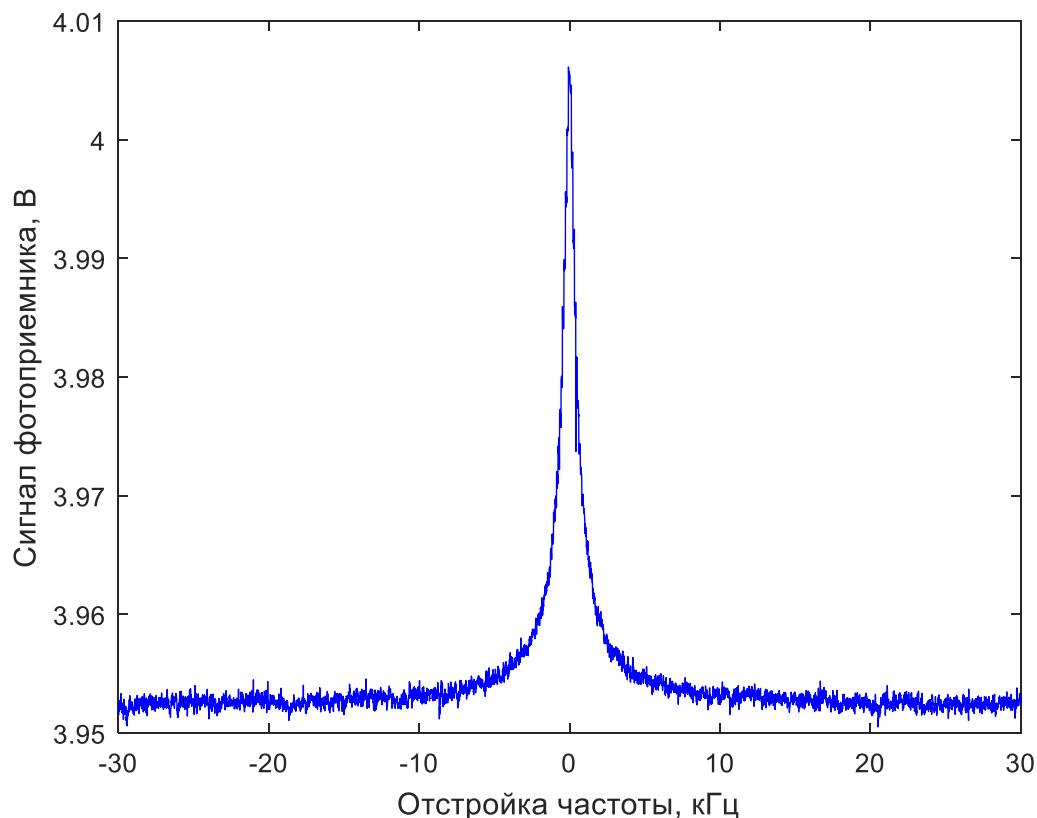


После обработки ячейки в мини-центрифуге с нагревом рубидий распределяется по боковой матовой поверхности ячейки и фиксируется на ней.

Верхний ряд фотографий-ячейки с рубидием до его распределения.

Нижний ряд фотографий-ячейки с рубидием после распределения.

Характеристики рубидиевых ячеек



КПН резонанс

1. Материал ячейки – кварц.

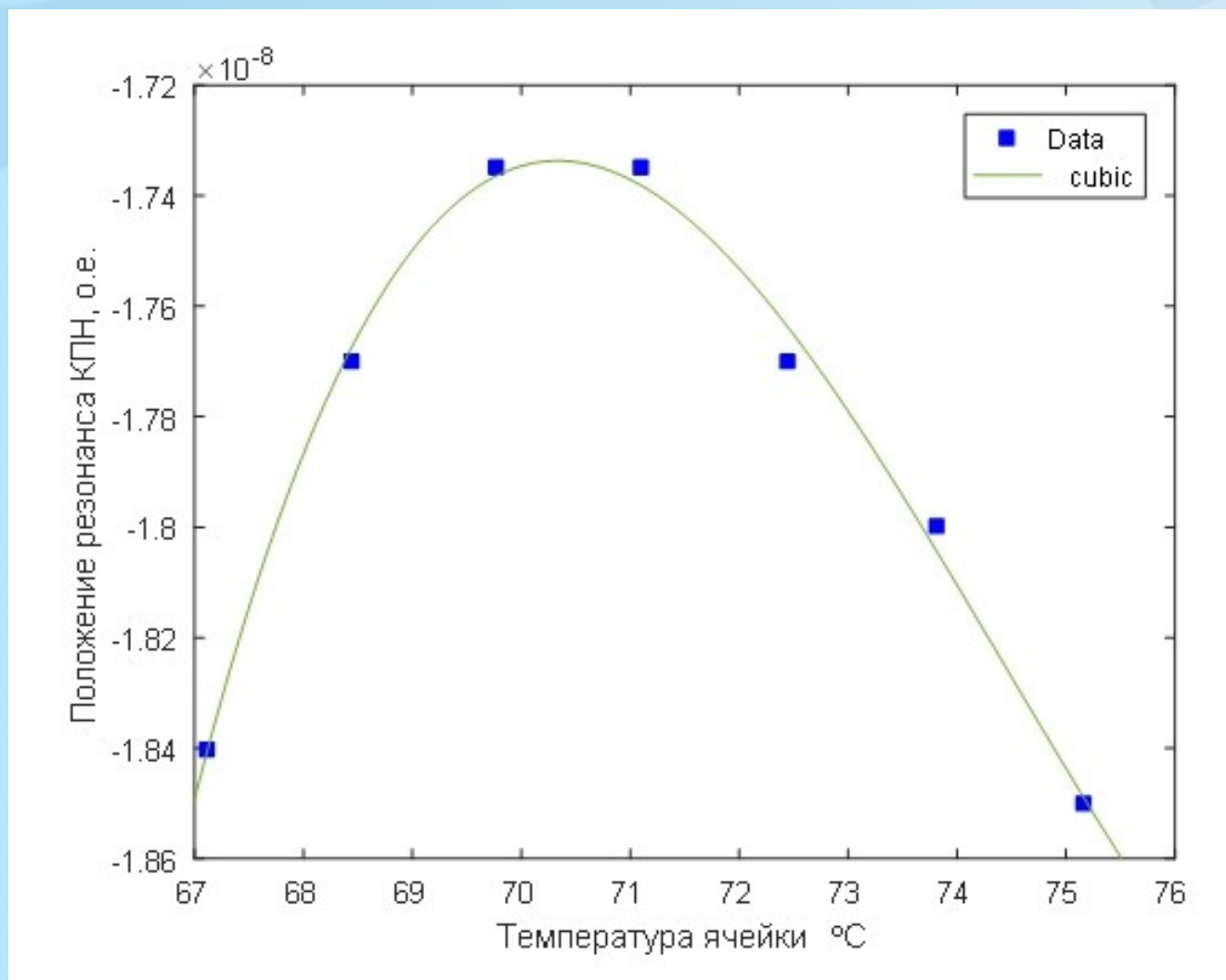
2. Размеры: Ø8,6 x 9.5 мм

**3. Состав буферного газа:
Аргон/Азот = 58.5%/41.5%.**

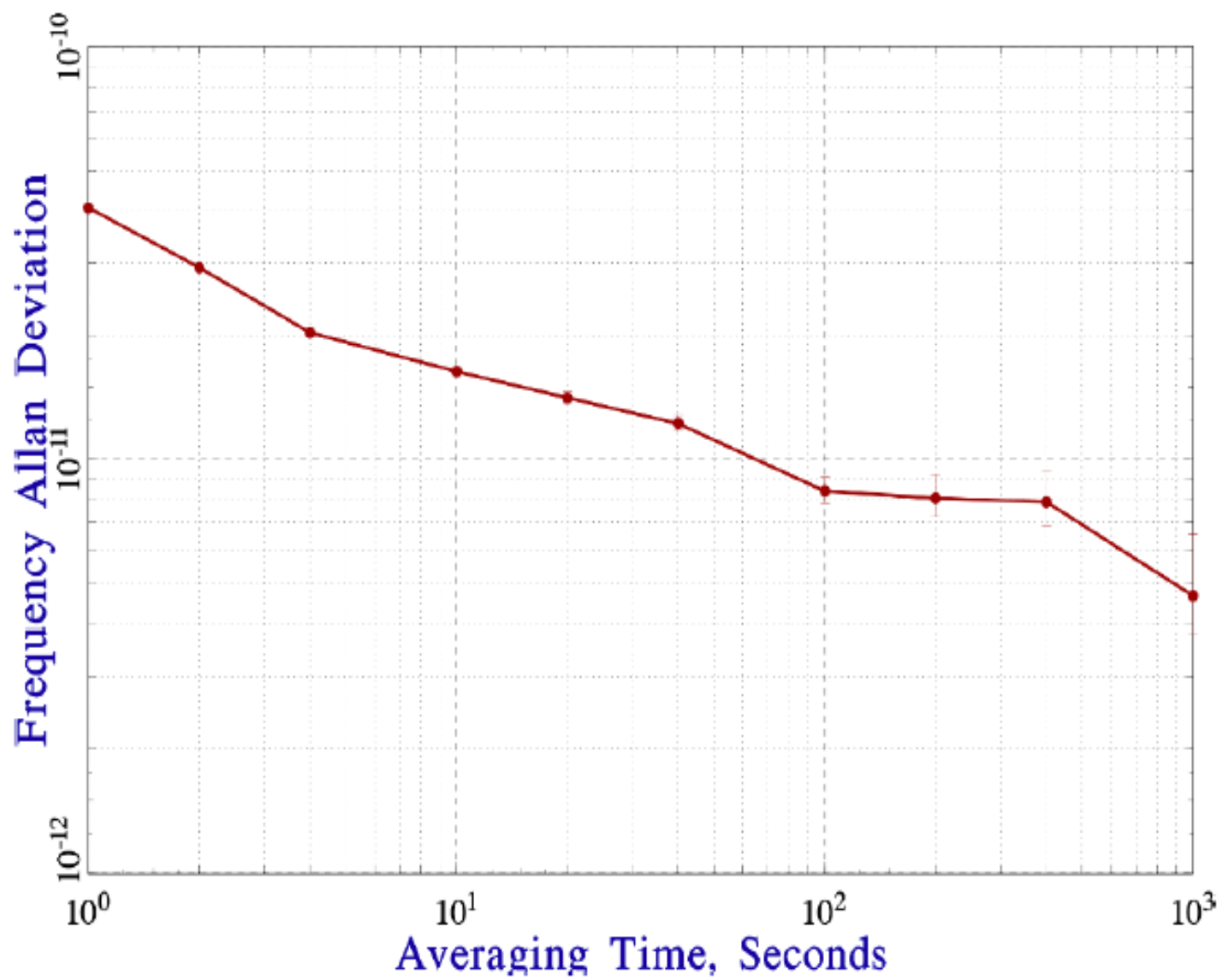
**4. Параметры регистрации
резонанса КПН:
- интенсивность лазерного
излучения: 50 мкВт (795 нм);
- диаметр пучка: 1,5 мм.**

**5. Параметры КПН
резонанса:
- ширина на полувысоте:
1150 Гц;
- контраст: 1,4%.**

Характеристики рубидиевых ячеек



Зависимость положения резонанса КПН от температуры



Typical Allan deviation of the CPT atomic clock с изготовленной ячейкой.

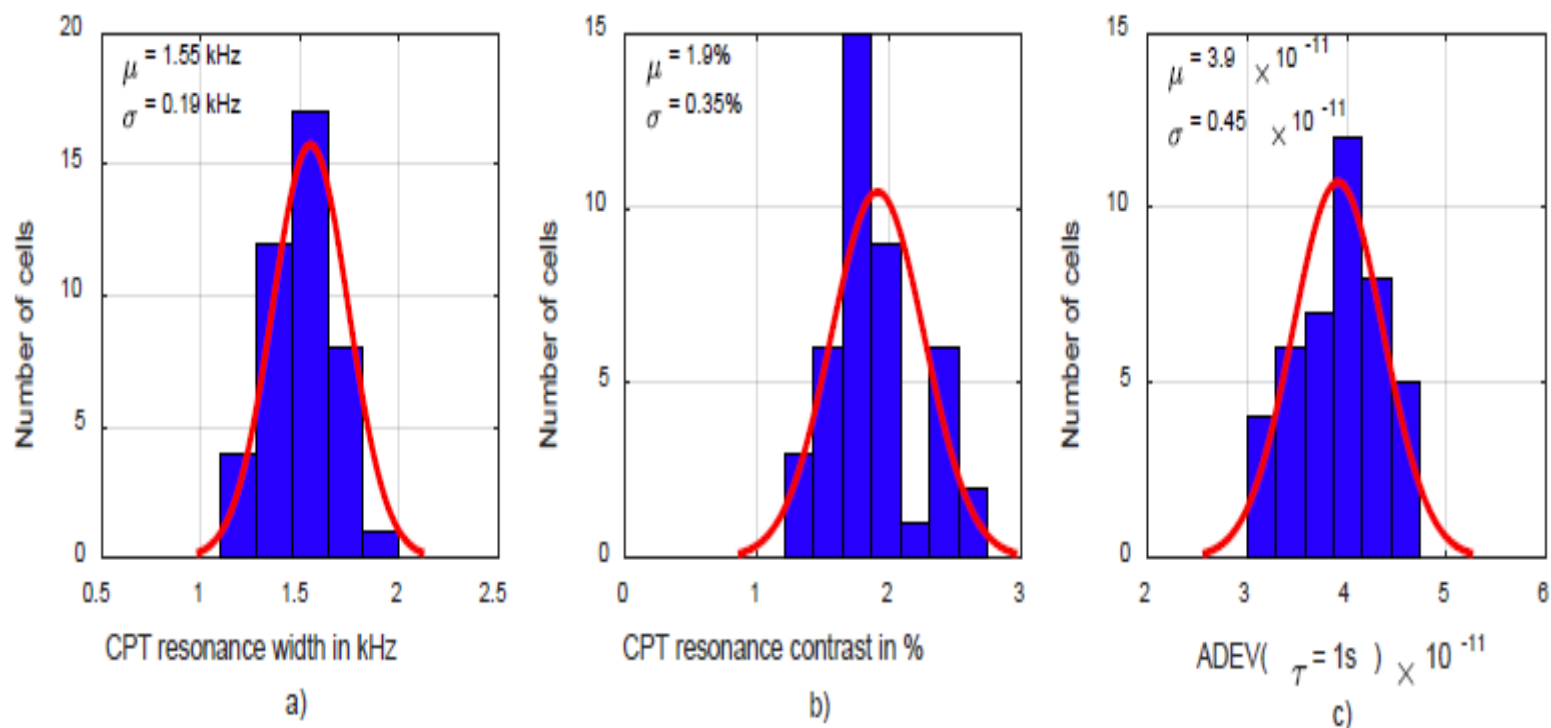
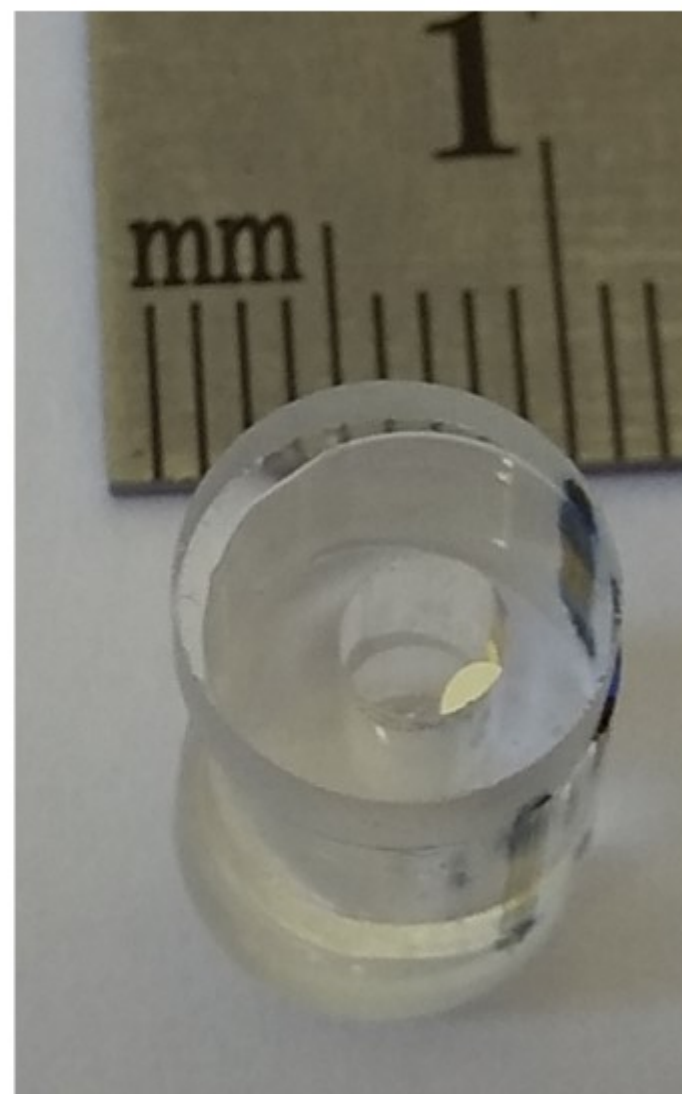
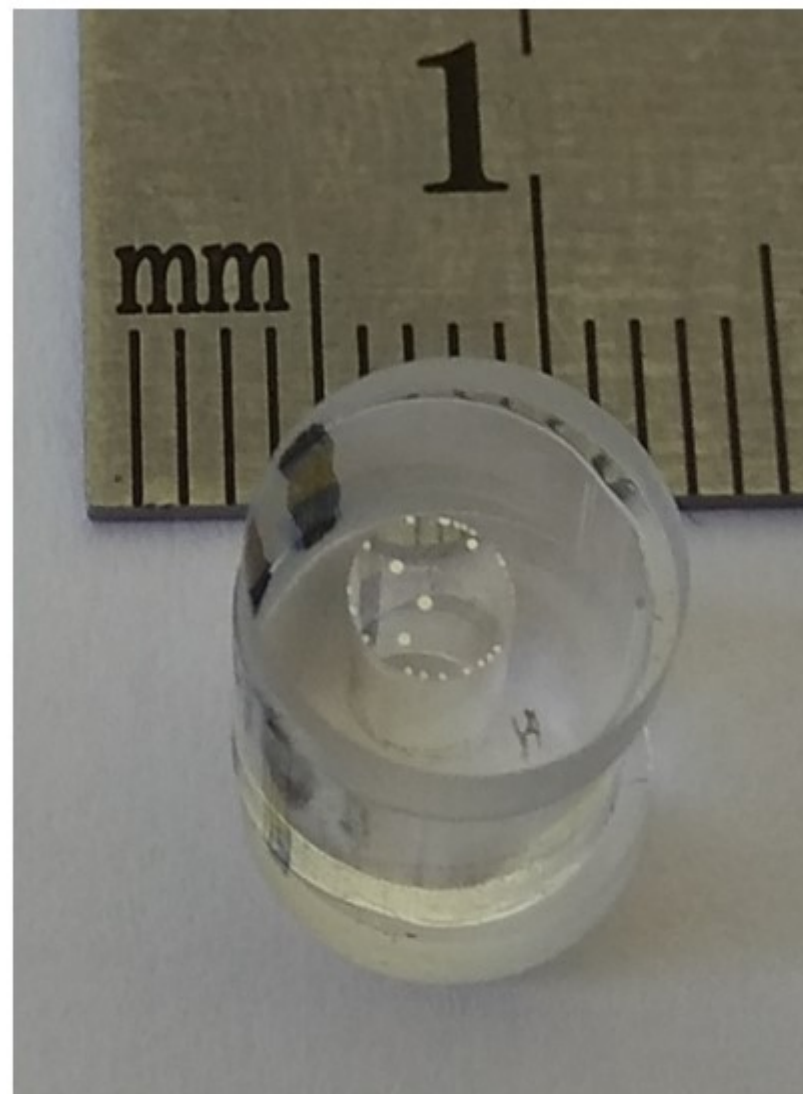


Рис. 8. Статистика результатов тестирования 42 ячеек: а) распределение ячеек по ширине КПН резонанса; б) распределение ячеек по контрасту КПН резонанса; в) распределение ячеек по кратковременной нестабильности атомных часов.

Фото ячейки

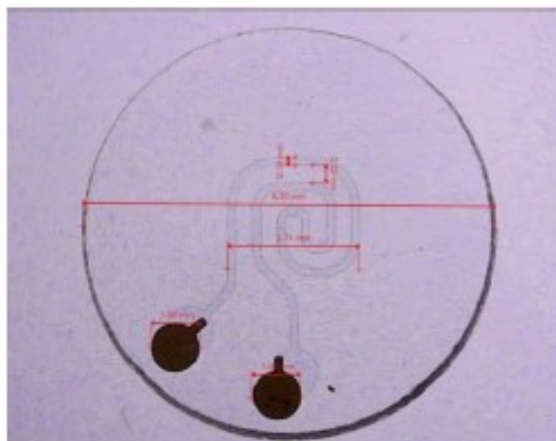


ВНИИФТРИ

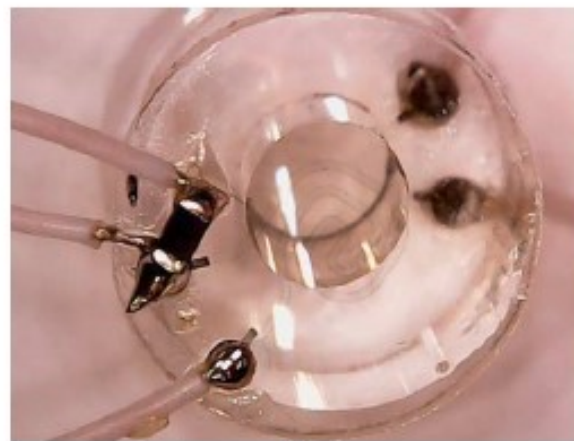
МЭМС-ячейки с парами рубидия и буферным газом



ЯЧК-РУБ - Ø8,4 x 9,0 мм

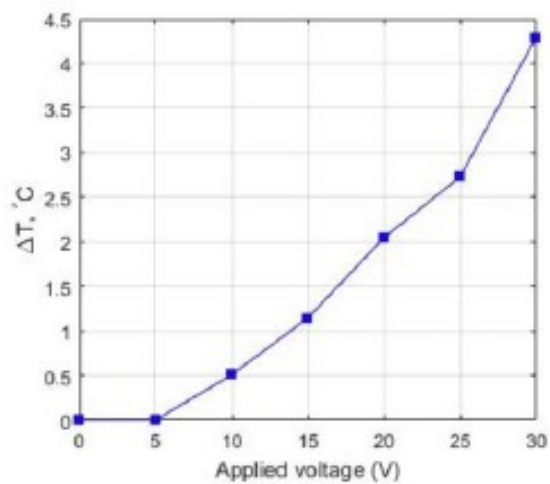


а

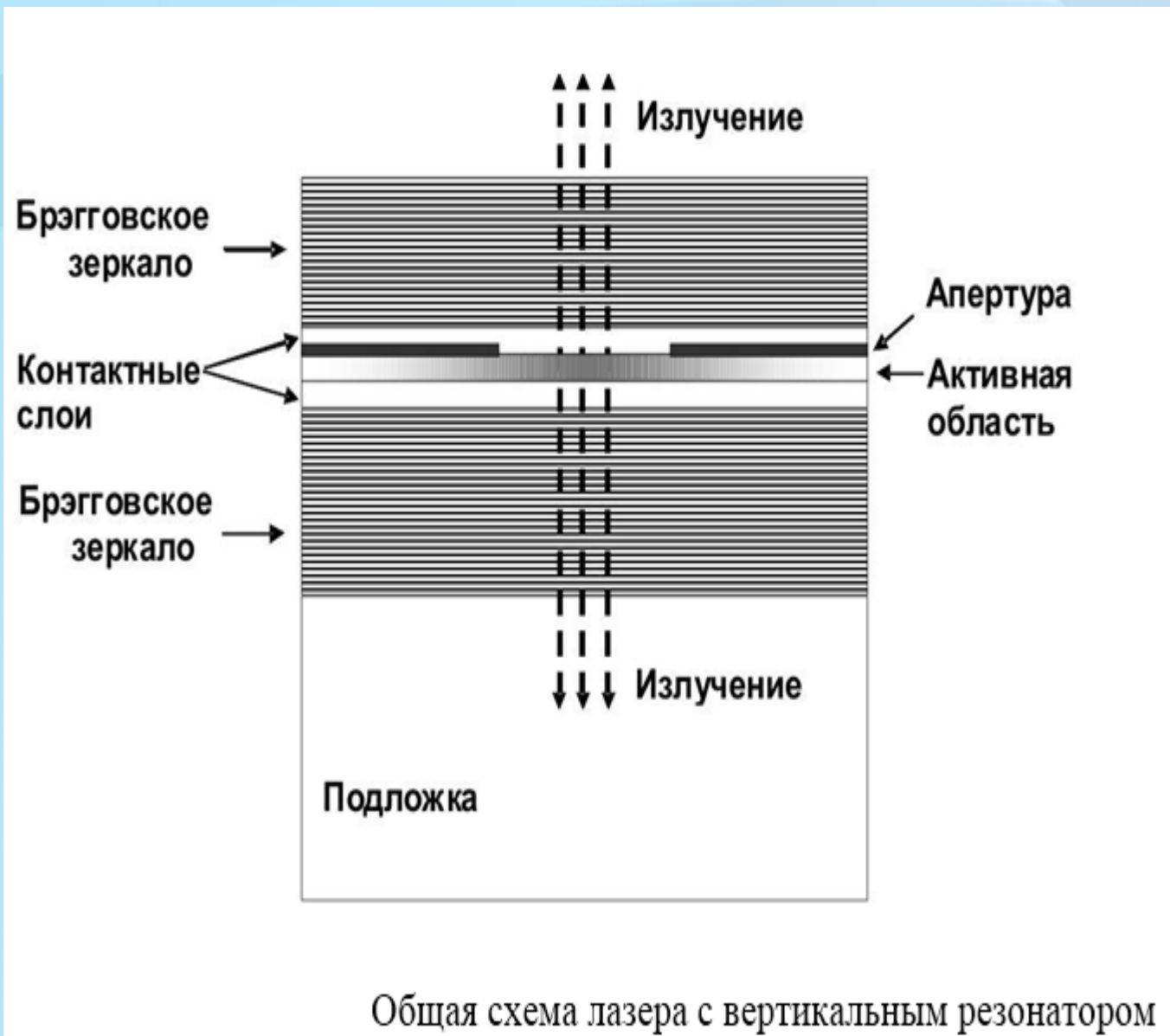


б

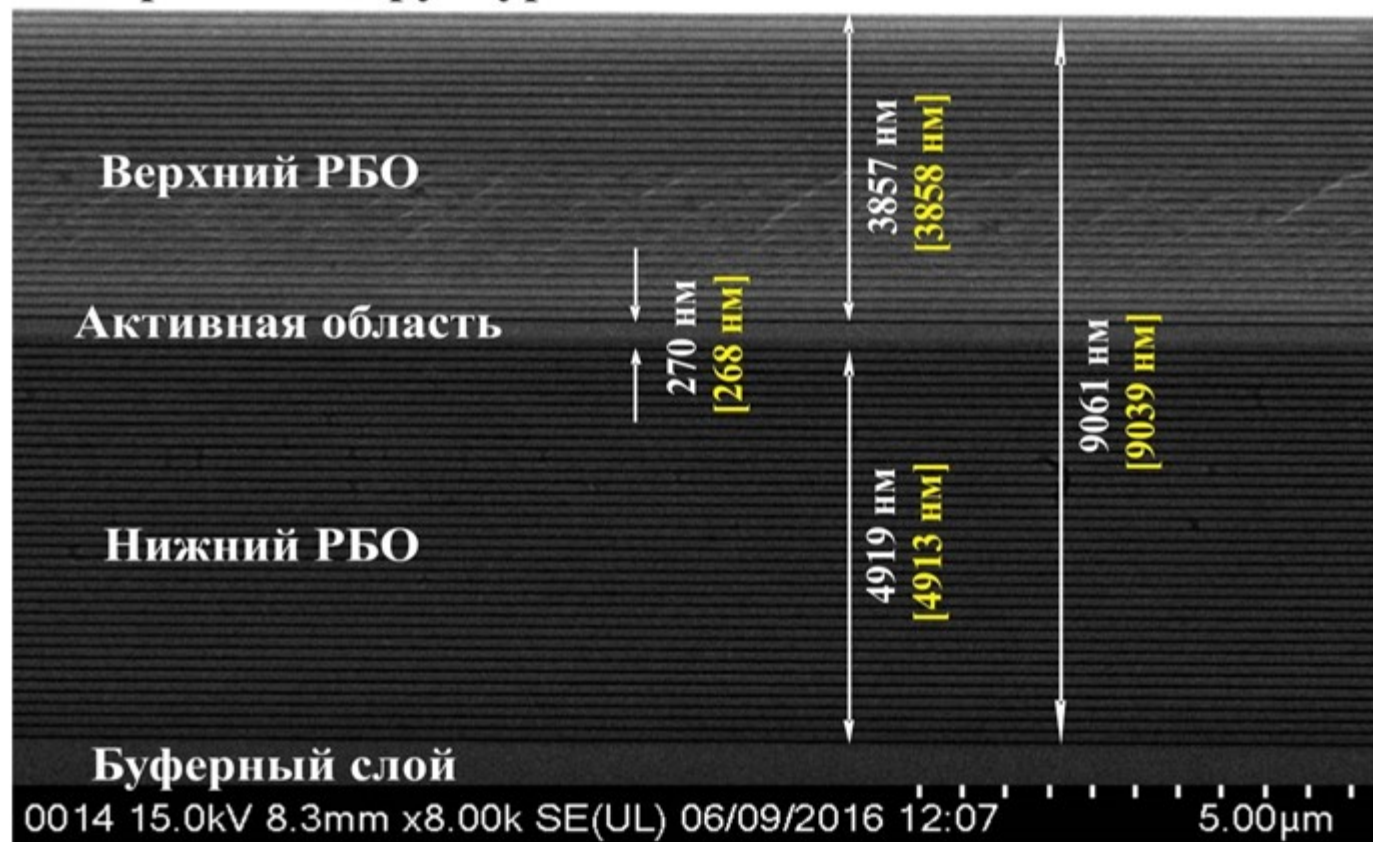
Фотографии окон ячейки с нанесёнными проводящими структурами.



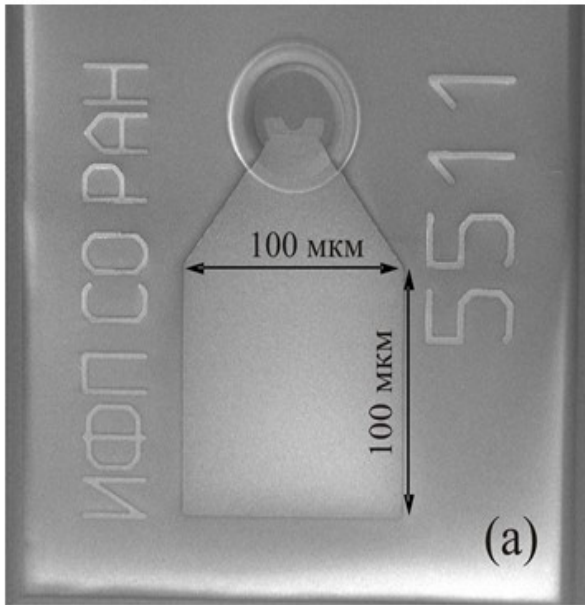
Зависимость увеличения температуры окна ячейки от напряжения на проводящей структуре на окне ячейки.



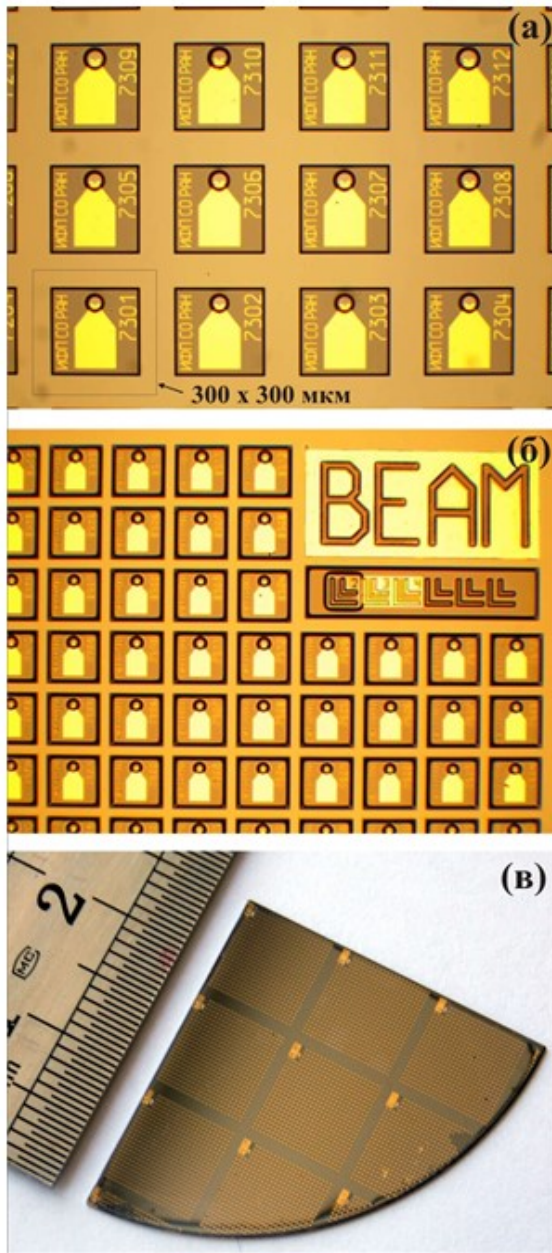
Поверхность структуры



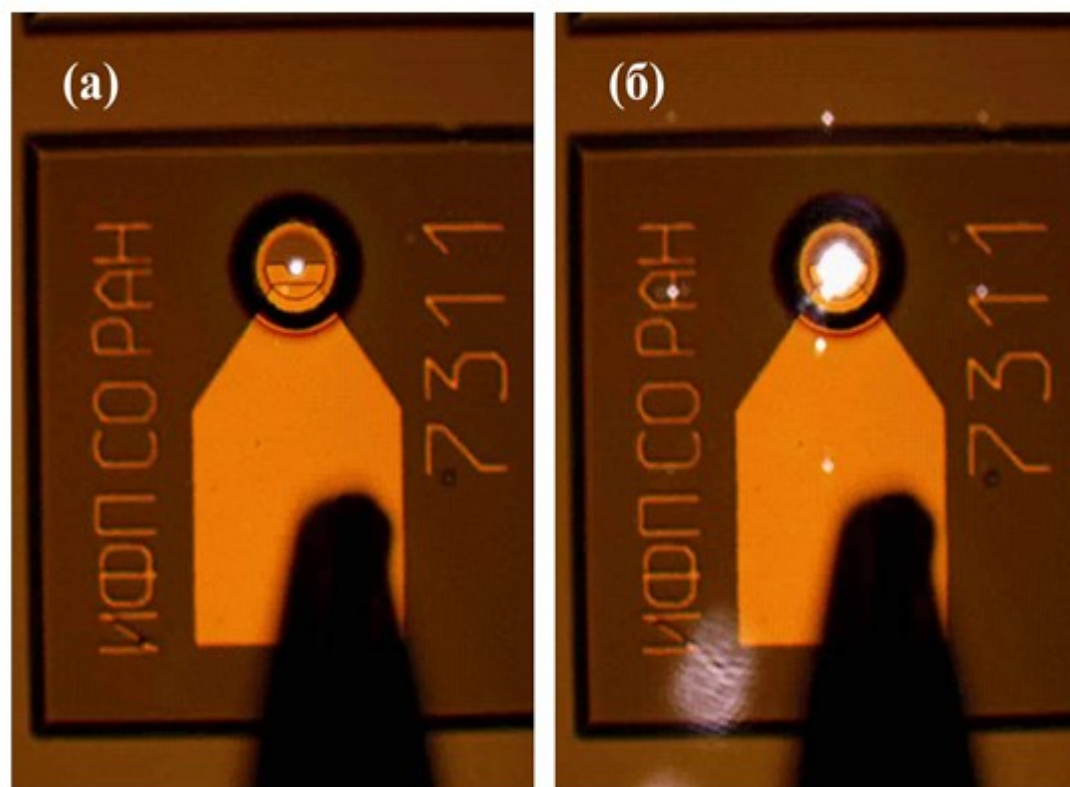
СЭМ изображение полной лазерной структуры, полученное на сколе структуры, сделанном вдоль направления [110].



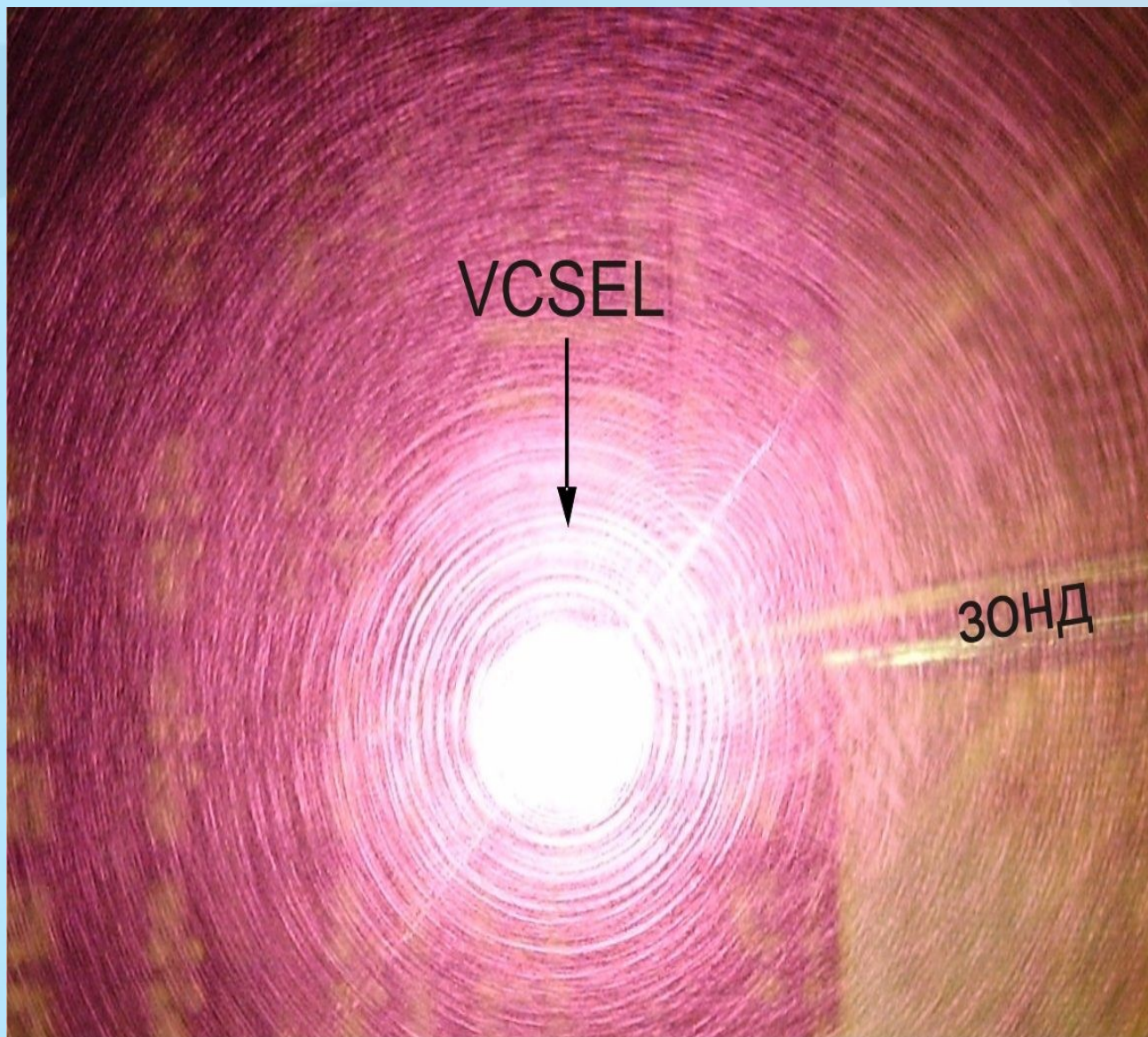
СЭМ изображение (а) и микрофотография (б) лазерных чипов.

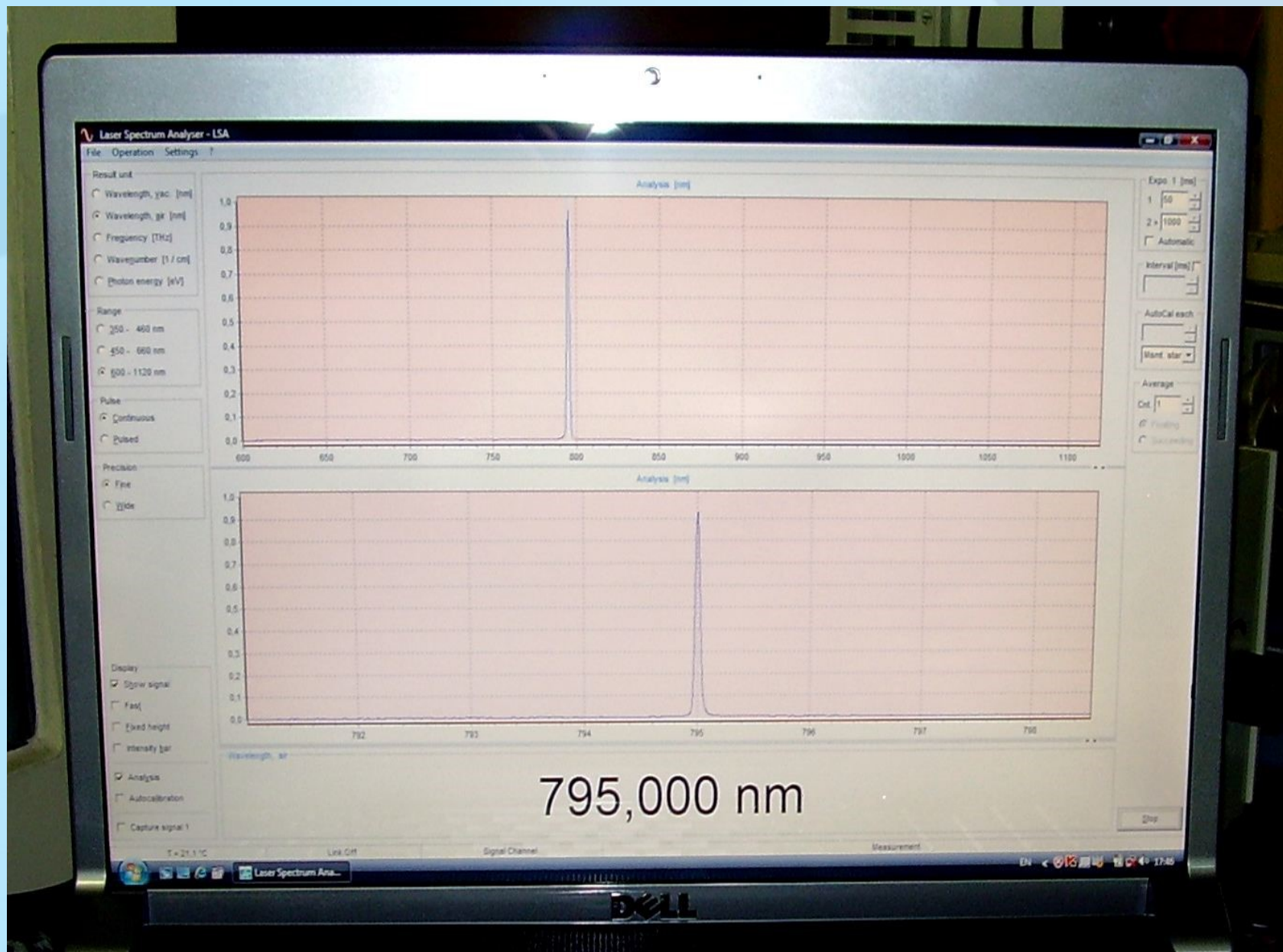


Микрофотографии поверхности лазерной структуры (а), (б) и фотография 1/4 двухдюймовой пластины, содержащей полностью завершенные ЛВР (в).



Микрофотографии полностью завершённых лазеров, (а) - ЛВР вблизи порога генерации ($I_{th} \approx 0.5 \text{ mA}$), (б) - ЛВР в генерационном режиме ($I \approx 3I_{th}$).





ВНИИФТРИ

Заключение:

- Наиболее перспективным вариантом сверхминиатюрного высокостабильного квантового стандарта частоты является стандарт частоты на основе КПН, который сочетает в себе низкую кратковременную и долговременную нестабильность частоты, а также малые габариты и низкое энергопотребление.
- Дальнейшим возможным развитием таких стандартов частоты могут быть стандарт частоты с импульсной лазерной оптической накачкой и с импульсным возбуждением КПН-резонансов, имеющих кратковременную нестабильность на уровне нескольких единиц 10^{-13} на интервале времени измерения 1 с и долговременную на уровне нескольких единиц 10^{-15} на суточном интервале времени измерения.