

Ультрастабильные лазерные системы для задач прецизионной спектроскопии и бортовых применений

К. С. Кудеяров, Н. О. Жаднов, И. А. Семериков,
А. В. Масалов, В. Н. Сорокин, К. Ю. Хабарова,
Н. Н. Колачевский

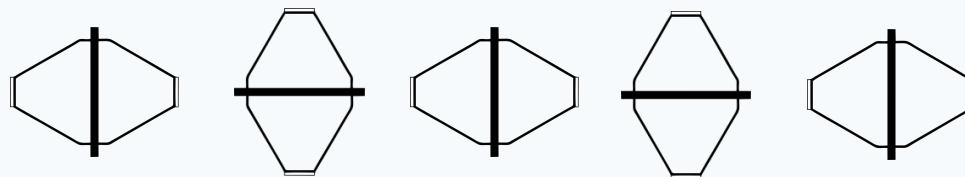
Физический институт имени П. Н. Лебедева Российской академии наук

Российский квантовый центр



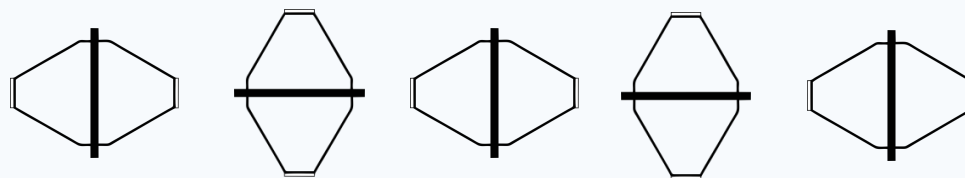
Содержание доклада

- Ультрастабильные лазеры: зачем?
- Что ограничивает стабильность?
- Холоднее: кремниевый резонатор
- Длиннее: большие ULE-резонаторы
- Компактнее: резонаторы для бортовых применений



Содержание доклада

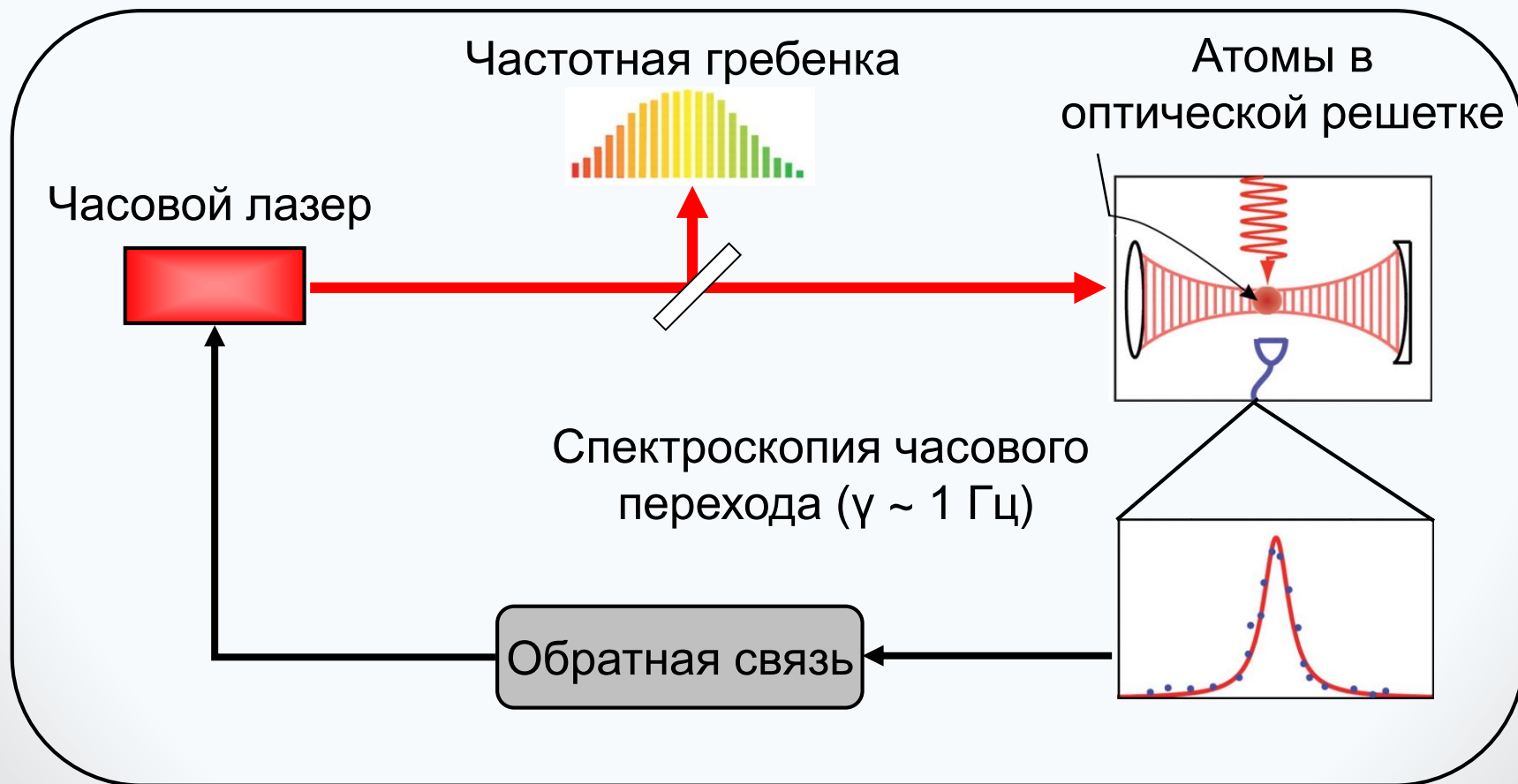
- Ультрастабильные лазеры: зачем?
- Что ограничивает стабильность?
- Холоднее: кремниевый резонатор
- Длиннее: большие ULE-резонаторы
- Компактнее: резонаторы для бортовых применений



Ультрастабильные лазеры: зачем?

Оптические стандарты частоты: 10^{-18} за 7 часов

[Hinkley et al., *Science*, 341(6151), 1215–18]

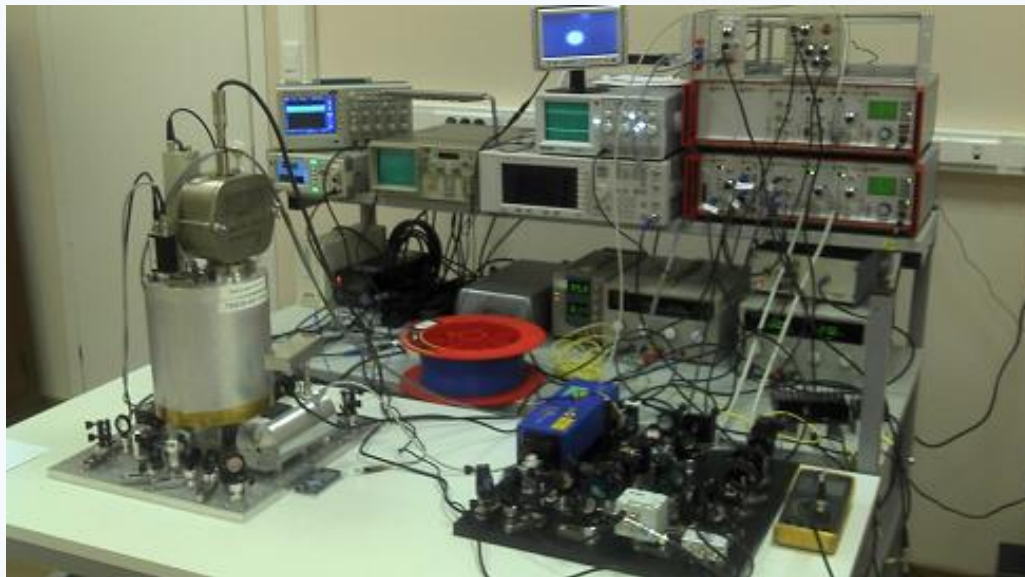
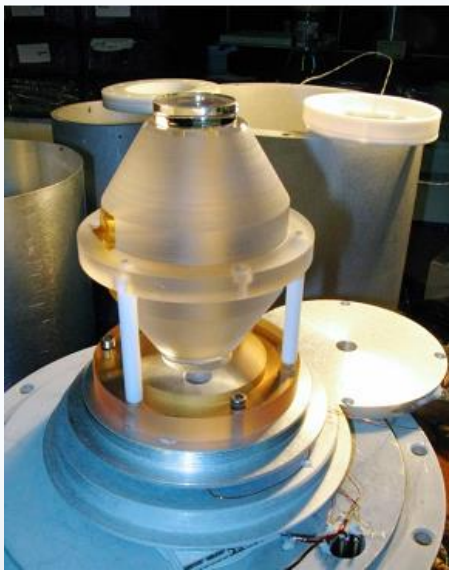


Стабилизация лазеров по резонаторам Фабри-Перо

- Метод Паунда-Дривера-Холла: привязка к пику пропускания

[Drever et al., *Appl. Phys. B*, 31(2), 97–105]

- ULE-резонаторы: стабилизация с $\Delta\nu \sim 1$ Гц



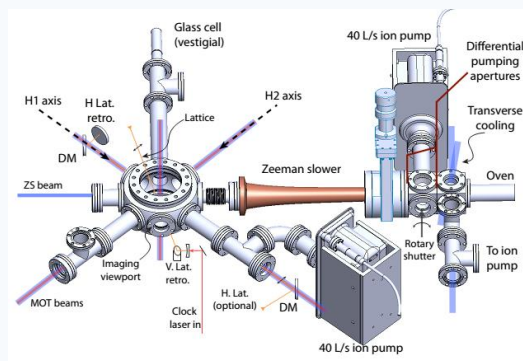
Какая стабильность нужна?

- Шумы лазера ограничивают стабильность часов на малых временах (эффект Дика)

[Quessada et al., *Journ. of Opt. B*, 5(2), 150–4]

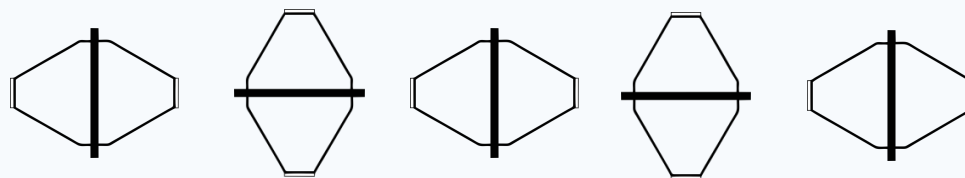


- Оптический стандарт частоты на атомах стронция (ВНИИФТРИ и ФИАН): необходима нестабильность лазера $\sim 10^{-16}$



Содержание доклада

- Ультрастабильные лазеры: зачем?
- **Что ограничивает стабильность?**
- Холоднее: кремниевый резонатор
- Длиннее: большие ULE-резонаторы
- Компактнее: резонаторы для бортовых применений



■ Что ограничивает стабильность? ■

$$FSR = \frac{c}{2L}$$

$$\frac{\delta f}{f} = \frac{\delta L}{L}$$

Колебания
температуры

Тепловые шумы

Вибрации

■ Что ограничивает стабильность? ■

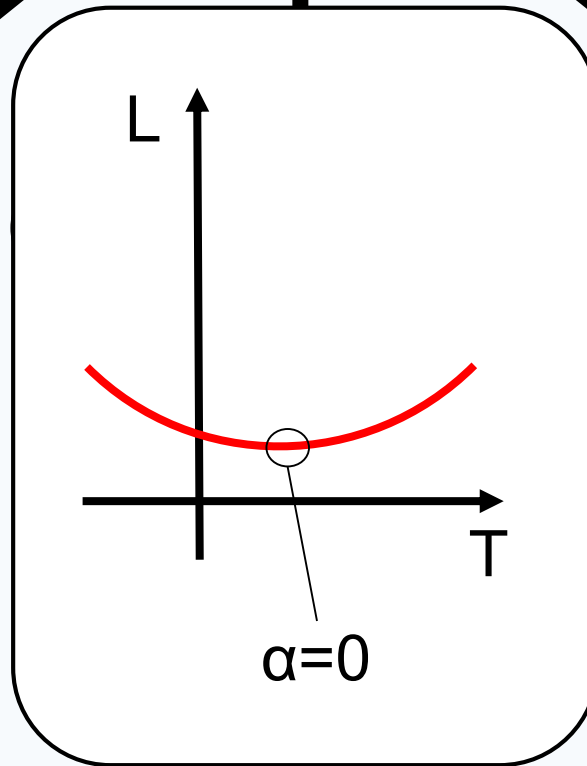
$$FSR = \frac{c}{2L}$$

$$\frac{\delta f}{f} = \frac{\delta L}{L}$$

Колебания температуры

Вибрации

Стабилизация температуры в нулевой точке



■ Что ограничивает стабильность? ■

$$FSR = \frac{c}{2L}$$

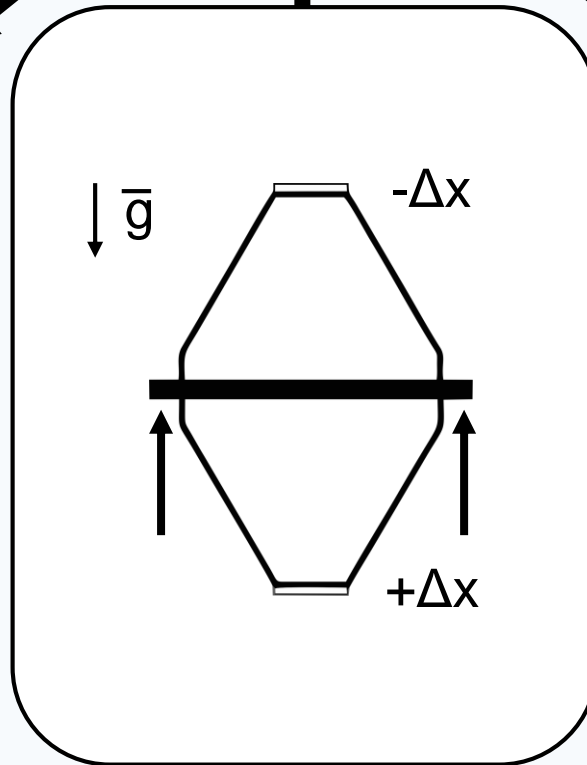
$$\frac{\delta f}{f} = \frac{\delta L}{L}$$

Колебания температуры

Вибрации

Стабилизация температуры в нулевой точке

Вибрационно устойчивая система подвеса



■ Что ограничивает стабильность? ■

$$FSR = \frac{c}{2L}$$

$$\frac{\delta f}{f} = \frac{\delta L}{L}$$

Колебания
температуры

Тепловые шумы

Вибрации

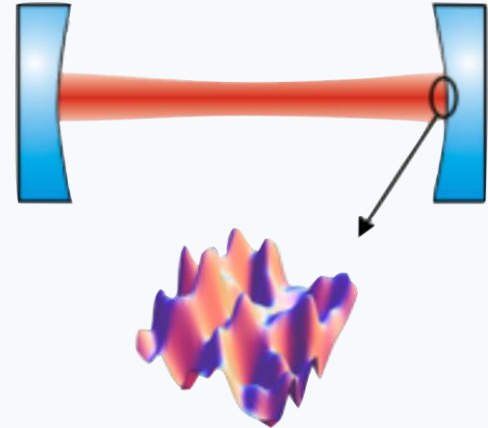
Стабилизация
температуры
в нулевой точке

Материалы,
размеры

Вибрационно
устойчивая
система подвеса

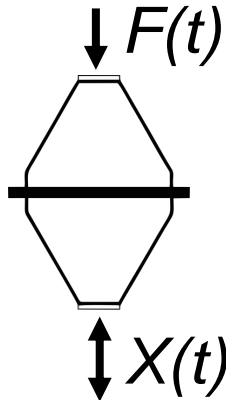
Тепловые шумы

- Тепловое возбуждение колебательных мод
- Расчет:



Флуктуационно-диссипационная теорема

$$H(f) \equiv \frac{\tilde{X}(f)}{\tilde{F}(f)}$$



$$S(f) = -\frac{2k_B T}{\pi f} \text{Im}[H(f)]$$

Метод Левина

[Levin, *Phys.Rev. D*, 57(2), 659–63]

$$S(f) = \frac{2k_B T}{\pi^2 f^2} \frac{W_{loss}}{F_0^2}$$

диссипация

Тепловые шумы

Тело резонатора

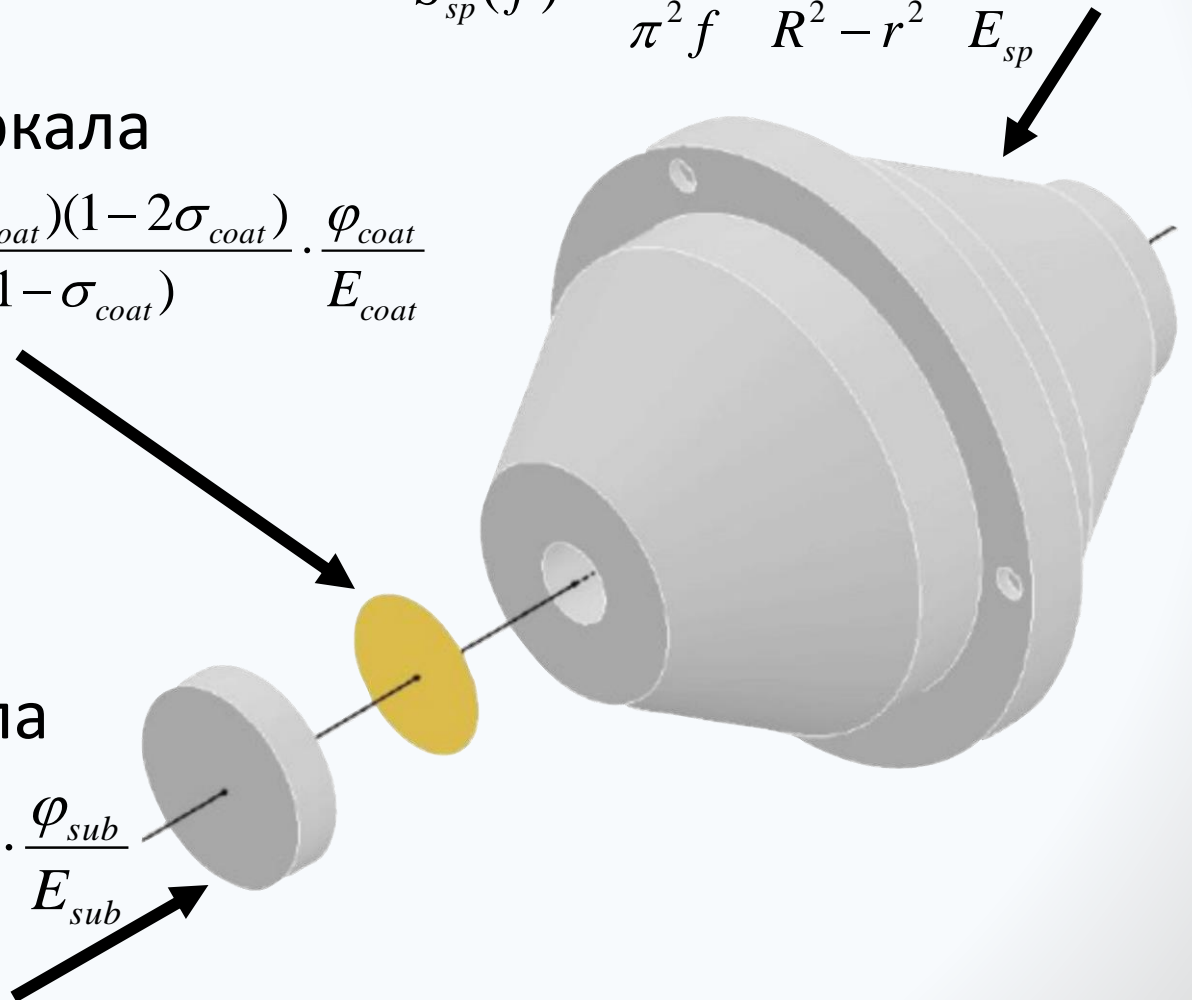
$$S_{sp}(f) = \frac{2k_B T}{\pi^2 f} \cdot \frac{L}{R^2 - r^2} \cdot \frac{\varphi_{sp}}{E_{sp}}$$

Покрытие зеркала

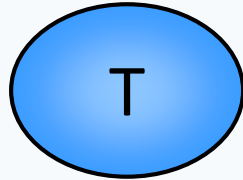
$$S_{coat}(f) = \frac{4k_B T}{\pi^2 f} \cdot \frac{d}{w^2} \cdot \frac{(1 + \sigma_{coat})(1 - 2\sigma_{coat})}{(1 - \sigma_{coat})} \cdot \frac{\varphi_{coat}}{E_{coat}}$$

Подложка зеркала

$$S_{sub}(f) = \frac{2k_B T}{\pi^{3/2} f} \cdot \frac{1 - \sigma_{sub}^2}{w} \cdot \frac{\varphi_{sub}}{E_{sub}}$$



Тепловые шумы



Тело резонатора

$$S_{sp}(f) = \frac{2k_B T}{\pi^2 f} \cdot \frac{L}{R^2 - r^2} \cdot \frac{\varphi_{sp}}{E_{sp}}$$

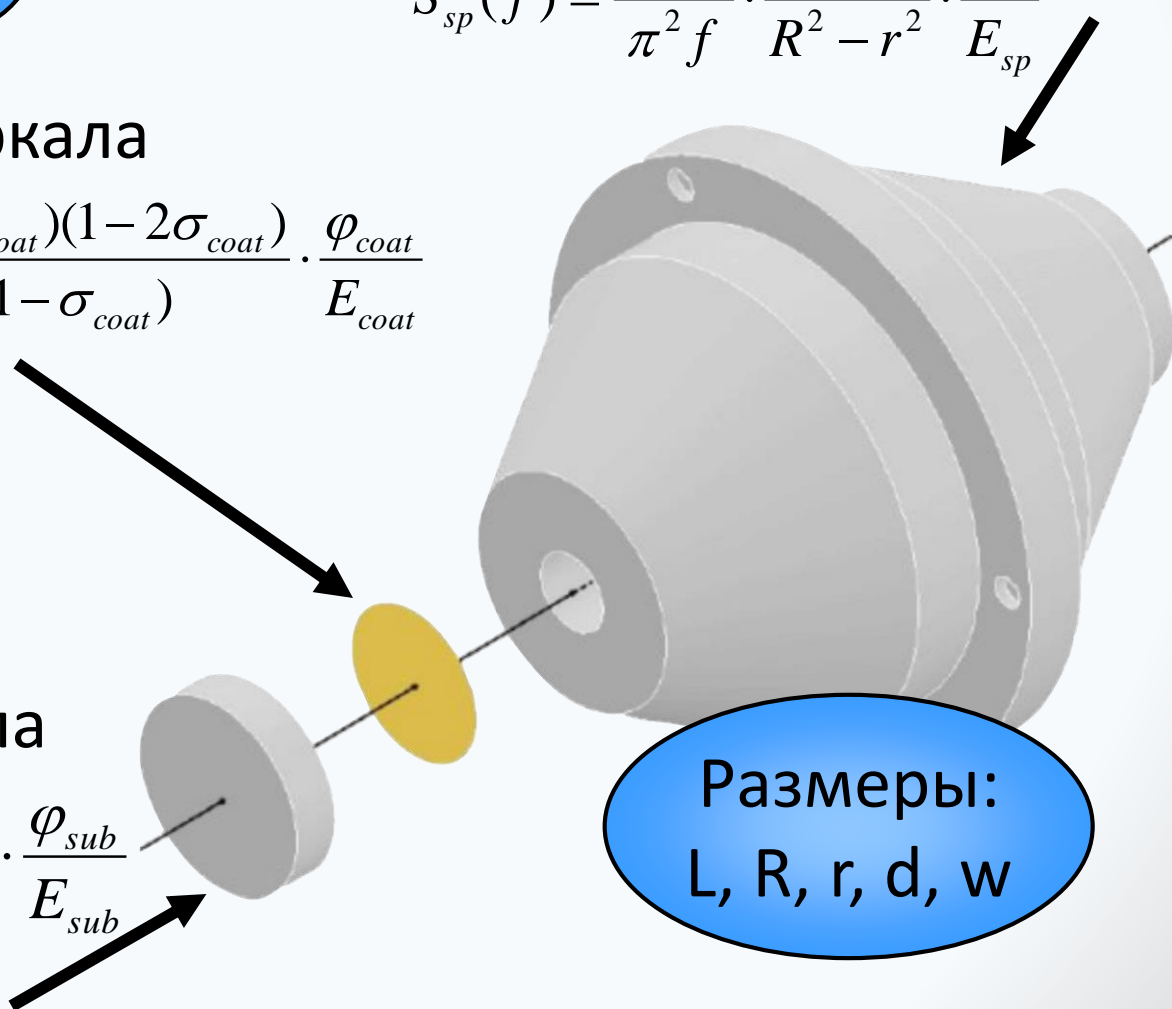
Покрытие зеркала

$$S_{coat}(f) = \frac{4k_B T}{\pi^2 f} \cdot \frac{d}{w^2} \cdot \frac{(1 + \sigma_{coat})(1 - 2\sigma_{coat})}{(1 - \sigma_{coat})} \cdot \frac{\varphi_{coat}}{E_{coat}}$$

Материал:
E, σ , ϕ

Подложка зеркала

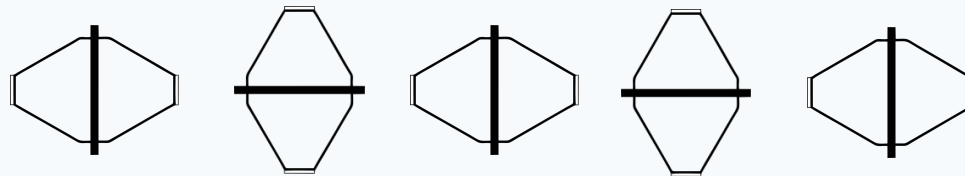
$$S_{sub}(f) = \frac{2k_B T}{\pi^{3/2} f} \cdot \frac{1 - \sigma_{sub}^2}{w} \cdot \frac{\varphi_{sub}}{E_{sub}}$$



Размеры:
L, R, r, d, w

Содержание доклада

- Ультрастабильные лазеры: зачем?
- Что ограничивает стабильность?
- **Холоднее: кремниевый резонатор**
- Длиннее: большие ULE-резонаторы
- Компактнее: резонаторы для бортовых применений



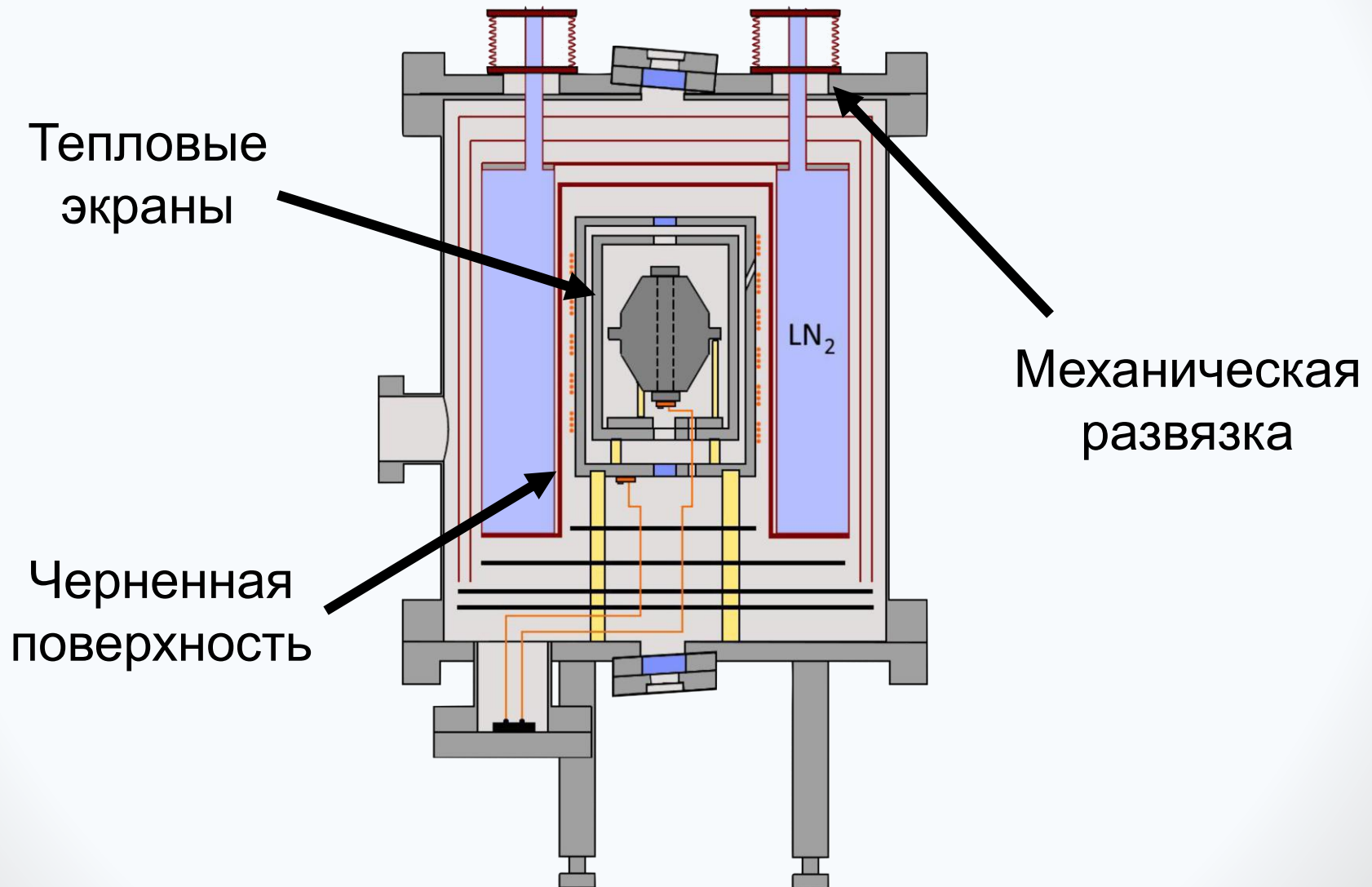
Кремниевый резонатор

- $\lambda > 1200$ нм
- Нулевые точки – 124 К и 4 К
- Высокая добротность и большой модуль Юнга
- Отсутствие линейного дрейфа собственных частот

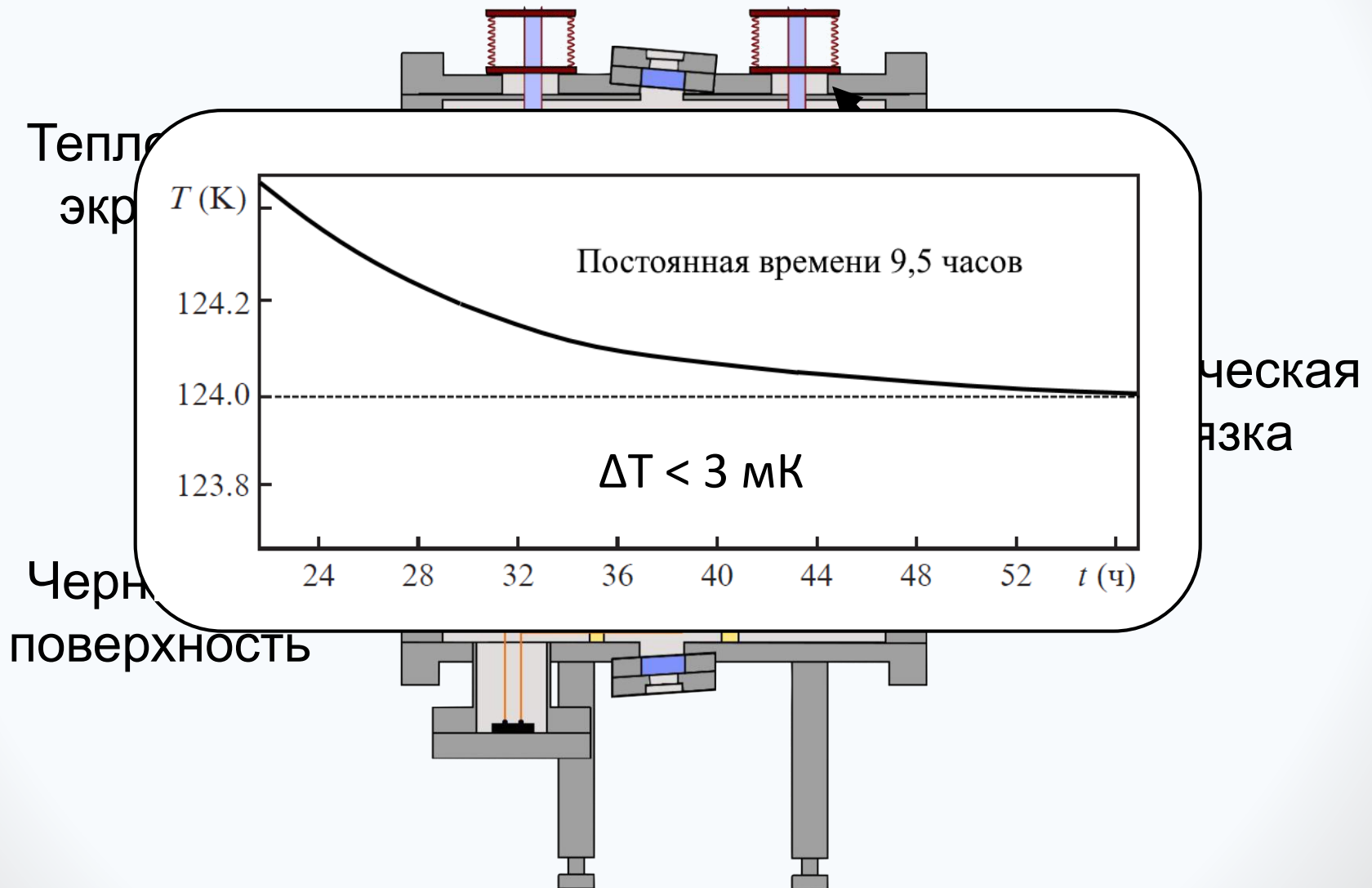
Материал тела	Материал подложки	Покрытие зеркал	Относительная нестабильность частоты
(вклад в тепловые шумы)			
Si (0.002 %)	Si (0.2 %)	SiO ₂ /Ta ₂ O ₅ (99.8 %)	2×10^{-16}
Si (0.04 %)	Si (4 %)	AlGaAs/GaAs (95 %)	4×10^{-17}



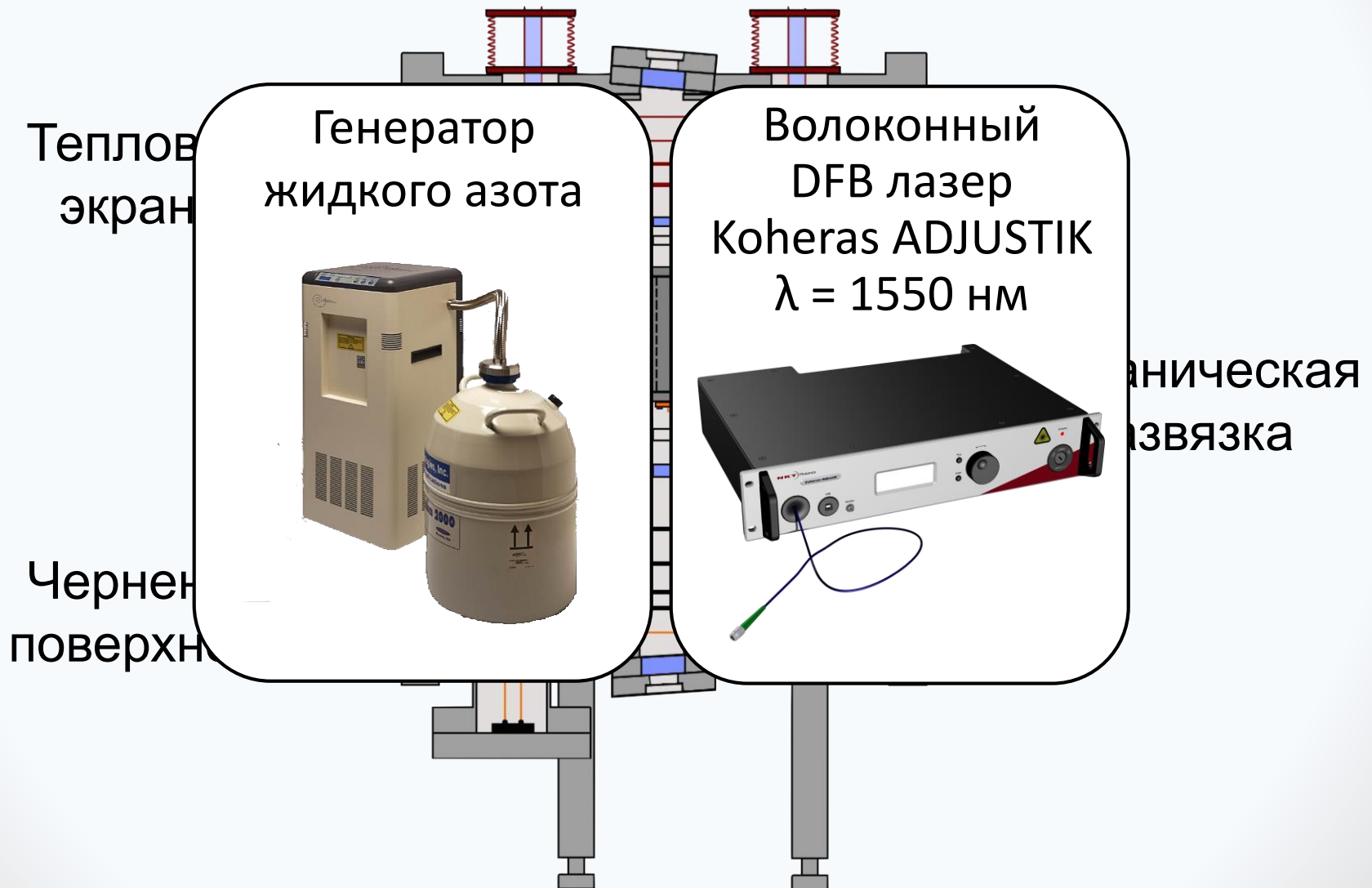
Кремниевый резонатор: криогенная вакуумная система



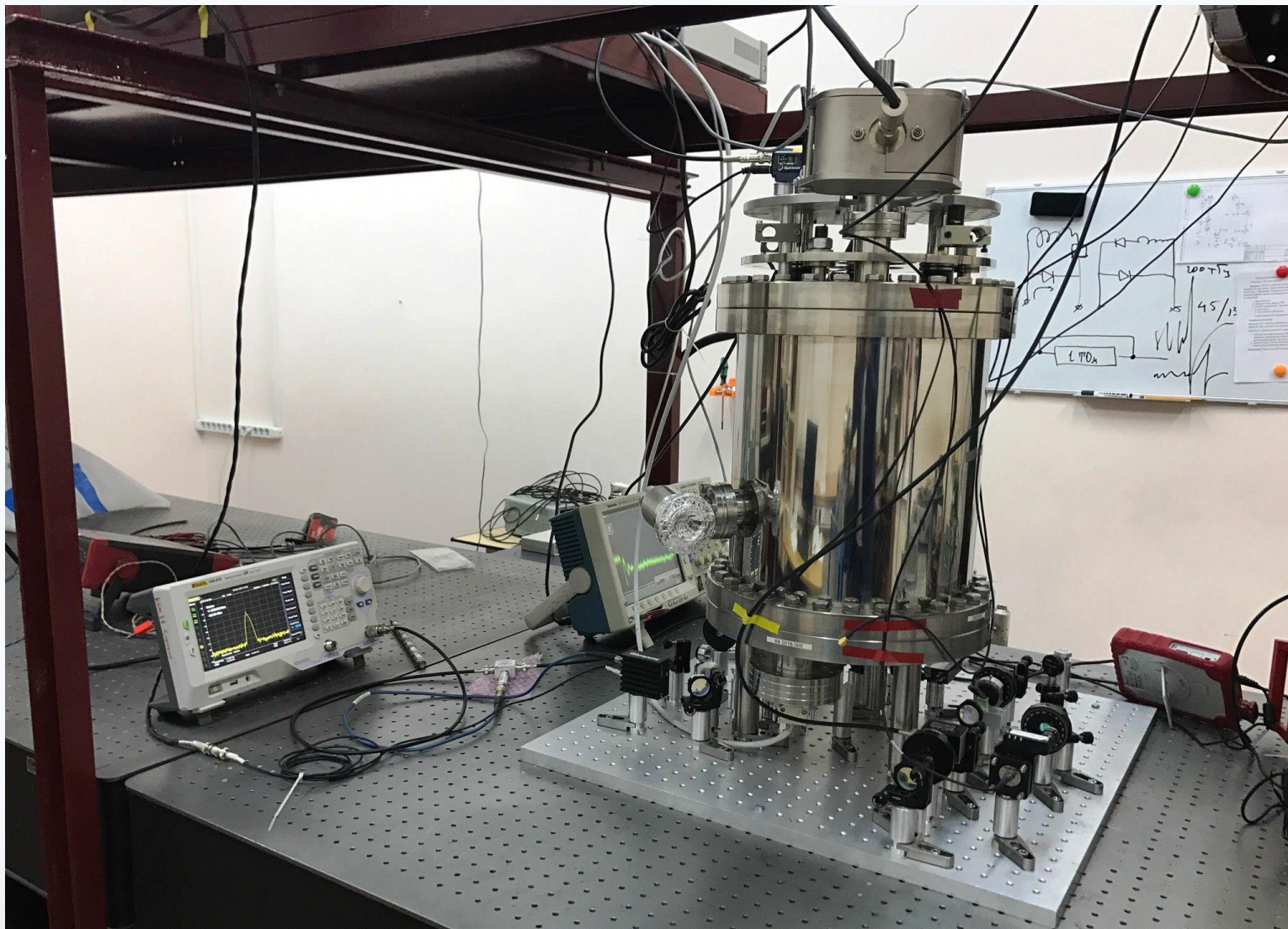
Кремниевый резонатор: криогенная вакуумная система



Кремниевый резонатор: криогенная вакуумная система

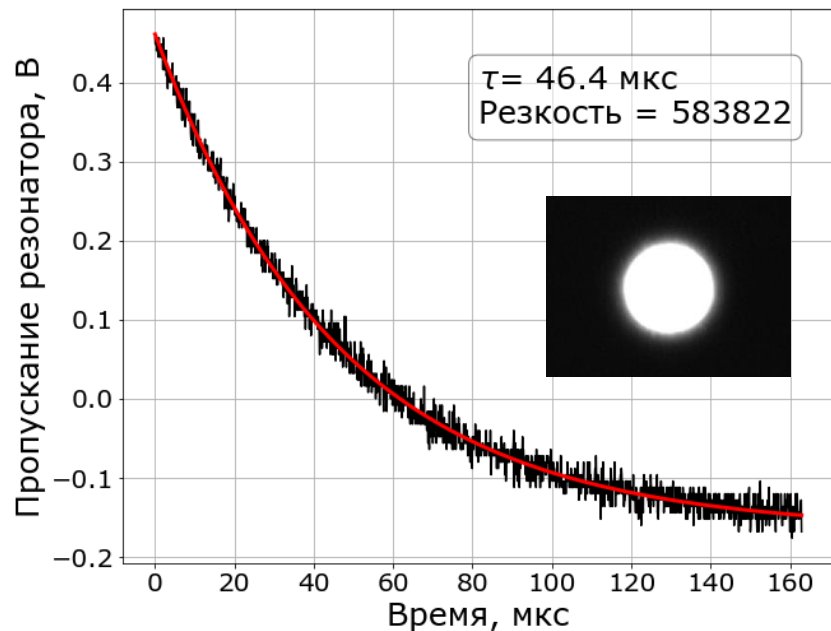


Кремниевый резонатор: криогенная вакуумная система

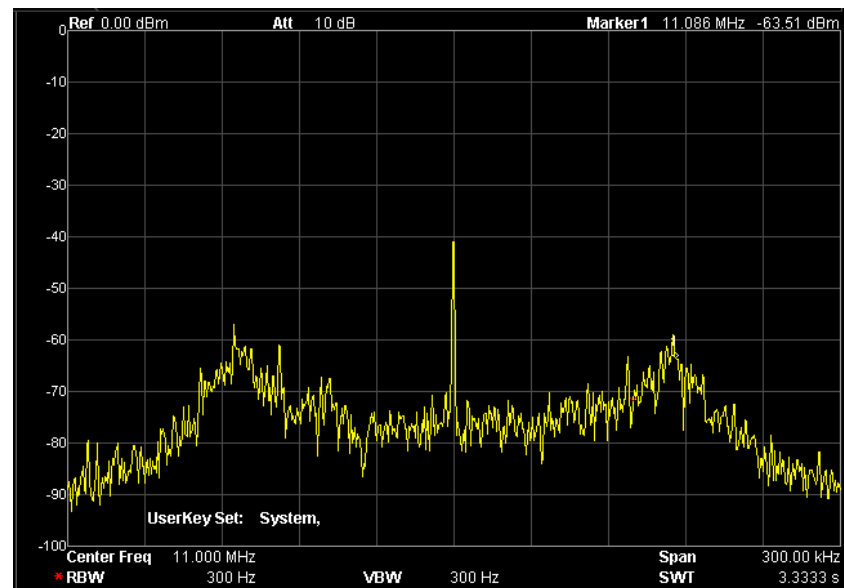


Кремниевый резонатор: результаты

Резкость резонатора
~ 580 000
(мода TEM₀₀)



Ширина полосы
обратной связи
~ 100 кГц
(АОМ + пьезо)



Кремниевый резонатор: результаты

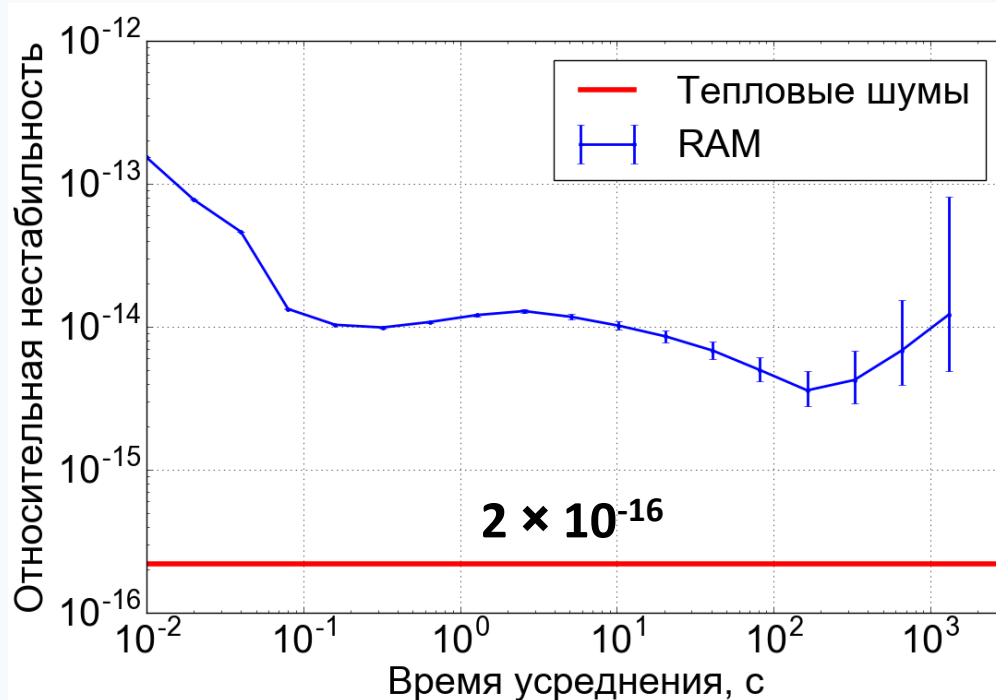
Электро-
оптический
модулятор



Остаточная
амплитудная
модуляция

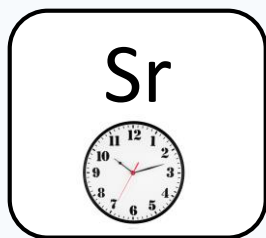


Паразитные
интерферометры
Фабри-Перо



Кремниевый резонатор: применение

- Передача ультрастабильных сигналов частоты по волоконным линиям на $\lambda = 1.5 \text{ мкм}$



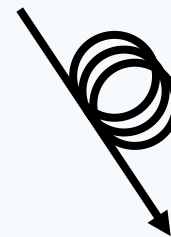
Оптические
часы

698 нм

Частотная
гребенка

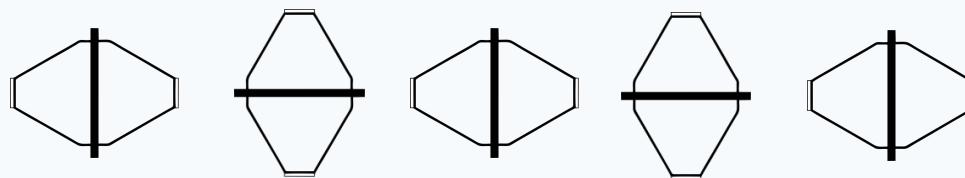


1550 нм



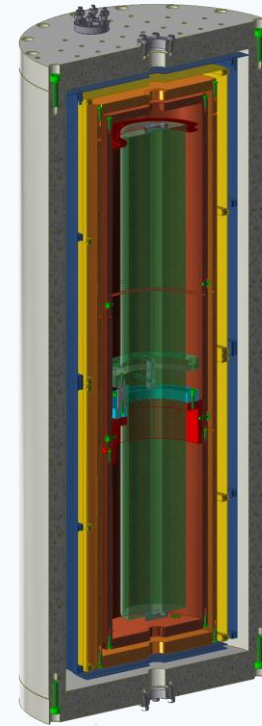
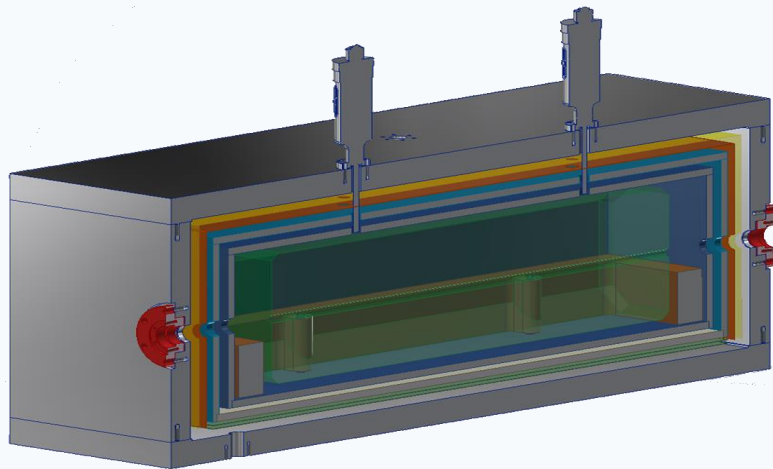
Содержание доклада

- Ультрастабильные лазеры: зачем?
- Что ограничивает стабильность?
- Холоднее: кремниевый резонатор
- **Длиннее: большие ULE-резонаторы**
- Компактнее: резонаторы для бортовых применений



Большие ULE-резонаторы

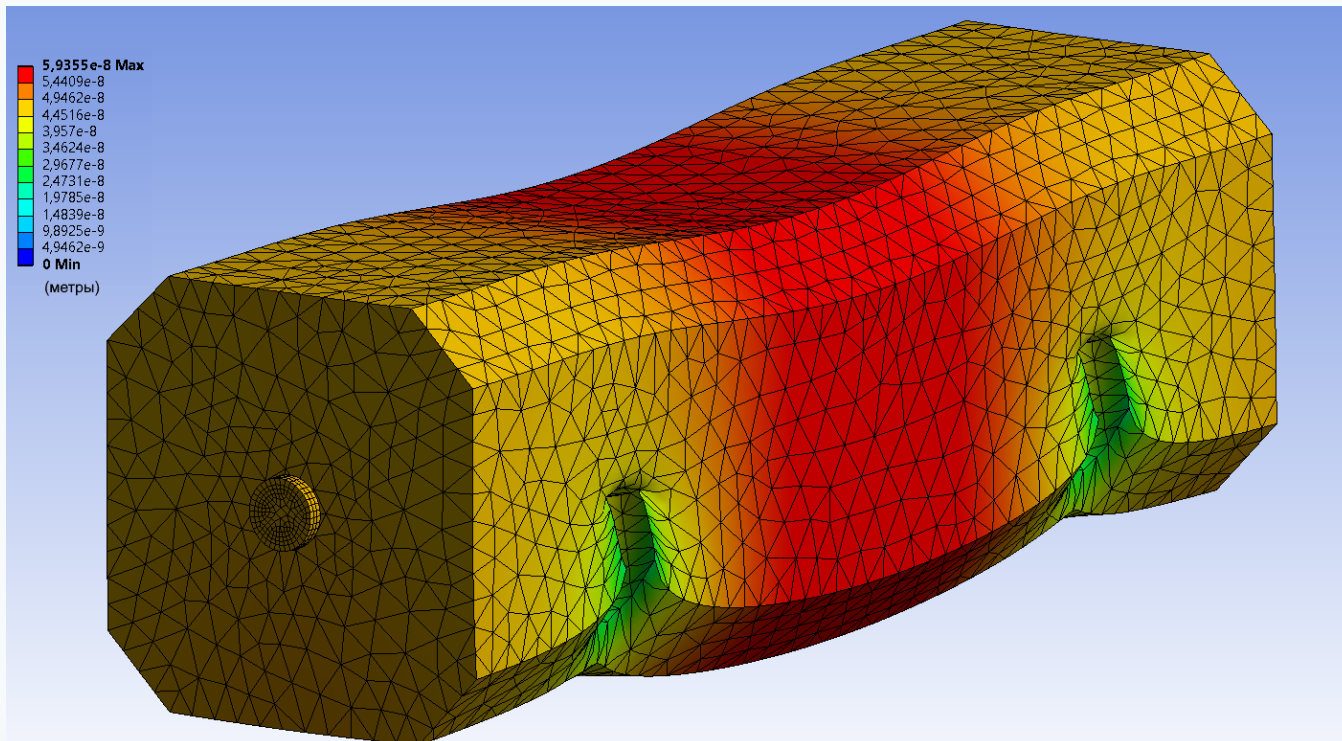
- $\lambda = 698$ нм (часовой переход в Sr)
- Длина ~ 50 см: увеличение моды



Материал тела	Материал подложки	Покрытие зеркал	Относительная нестабильность частоты
(вклад в тепловые шумы)			
ULE (3 %)	ULE (72 %)	$\text{SiO}_2/\text{Ta}_2\text{O}_5$ (25 %)	1.2×10^{-16}

Большие ULE-резонаторы: расчет геометрии

- Метод конечных элементов (FEA)
- Минимизация смещения и наклона зеркал при вертикальных ускорениях



Большие ULE-резонаторы: расчет геометрии

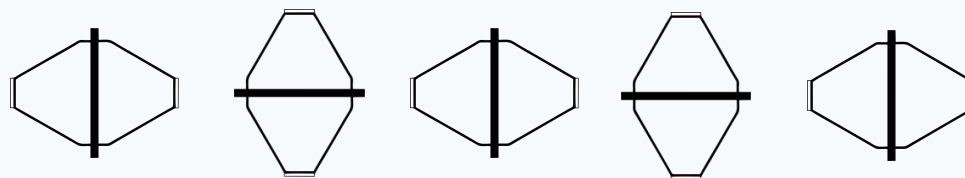
- Метод к
- Миним
- вертика

зеркал при



Содержание доклада

- Ультрастабильные лазеры: зачем?
- Что ограничивает стабильность?
- Холоднее: кремниевый резонатор
- Длиннее: большие ULE-резонаторы
- Компактнее: резонаторы для бортовых применений

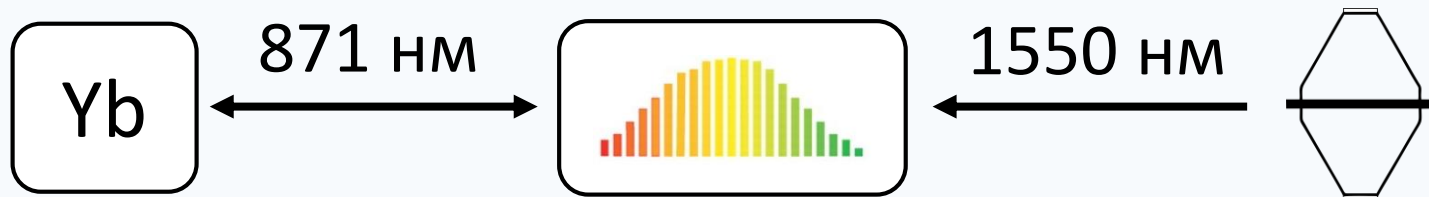


Резонаторы для бортовых применений

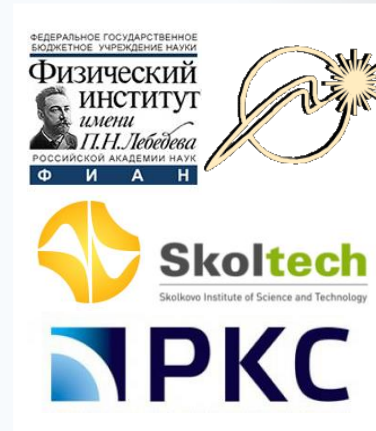
- Бортовой оптический репер частоты на одиночном ионе иттербия «ИБИС»

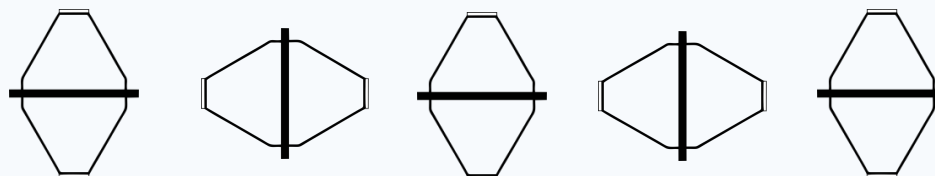
Подробнее: ytterbium.space

- Компактные ULE-резонаторы для стабилизации частотной гребенки и часового лазера:
 - Масса ~ 5 кг
 - Объем ~ 4 л
 - Нестабильность ~ 10^{-15}



Работа выполняется при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (Соглашение №14.610.21.0010)





Спасибо за внимание!

