Оптические мега и микрорезонаторы



 Гигантские оптические резонаторы с аттометровым разрешением
 <u>Размер – 4 км</u>

 Оптические микрорезонаторы с гигантской добротностью <u>Размер <100 мкм</u>



Гравитационные волны

LIGO



Нобелевская премия 1993 года (косвенное подтверждения)





LIGO Scientific Collaboration

Россия: 2 научные группы

США (LIGO) - 2.5 антенны 4 км × 2 + 2 км





Франция-Италия (VIRGO) 3 км

Германия-Англия (GEO-600) 600м



Япония (TAMA) – 300 m

Гравитационные антенны

LIGO

[М.Е.Герценштейн, В.И.Пустовойт // ЖЭТФ, 1962, Т.43, Вып. 2(8), С. 605]



Чувствительность антенны

$h_{+} = 10^{-21}$ $\Delta L = 10^{-21} \times 4 \text{ KM} = 4 \times 10^{-18} \text{ M}$







Ограничения чувствительности лазерных гравитационных антенн

- Фазовые шумы измерительного лазера (дробовой шум)
- Флуктуации радиационного давления
- 3. Шумы подвеса
- 4. Шумы зеркал
- 5. Сейсмические шумы
- 6. Флуктуации земной гравитации
- 6. Технические шумы





$\Delta l, \Delta n$

Шумы в зеркалах резонаторов



Термоупругий шум

V.B.Braginsky, M.L.Gorodetsky and S.P.Vyatchanin Phys. Letts A264 (1999) 1.

$$\langle \delta T^2 \rangle = \frac{k_B T^2}{\rho C V} \longrightarrow \frac{\partial L}{\partial T}$$

$$PACIIIUPEHUE U OXJAЖДЕНИЕ$$

$$\Im \chi(\omega) | = \frac{8k_B T}{\omega^2} \frac{W_{diss}}{F_0^2}$$

$$Rotor K TENJA$$

$$Rotor K TENJA$$

$$KATUE U HAIPEB$$

$$S_x(\omega) = \frac{4k_BT}{\omega} |\Im\chi(\omega)| = \frac{8k_BT}{\omega^2} \frac{W_{diss}}{F_0^2}$$

Большое множество разнообразных видов шумов, в которых пытаемся разобраться.



Частотные зависимости основных шумов из зоопарка в зеркалах лазерных гравитационных антенн.



Большое множество разнообразных видов шумов, в которых пытаемся разобраться.



Предыстория микрорезонаторов с модами шепчущей галереи

 1910 Рэлей объясняет акустические эффекты "шепчущей галереи" собора св. Павла в Лондоне



 1939 Рихтмайер: добротность может быть очень велика

 1977 Ашкин и Джиджич. Узкие резонансы при рассеянии света на каплях

1987 Брагинский и Ильченко. СВЧ кольцевые резонаторы. Добротность 10⁹



1989 Брагинский, Городецкий, Ильченко.
 Оптические микрорезонаторы из плавленого кварца.
 Добротность 3×10⁸
 (Индекс цитирования ISI - 281)



 1995 Городецкий, Савченков, Ильченко. Предельная добротность, ограниченная фундаментальными потерями в кварце 8×10⁹
 (Индекс цитирования ISI - 289)

Изготовление



Диаметр 10-1000 мкм, добротность 10⁶-10¹⁰

Микросферы в мире

OEwaves Inc, (Pasadena CA, USA) L.Maleki's lab (JPL, USA) H.J.Kimble's lab (Caltech, USA) K.Vahala's lab (Caltech, USA) S.Arnold's lab (Polytechnical University New York, USA) C.Tapalian's group (MIT Draper Laboratory, USA) R.Chang's lab (Yale Univ, USA) A. Rosenberger's lab (Oklahoma State Univ., USA) **Xponent Photonics Inc, USA** H.Wang's lab (Univ. of Oregon, USA) S. Blair's lab, (Univ. of Utah, USA) Nomadics Inc, (Monrovia CA, USA) T. Haensch's lab (LMU, MPQ Muenchen, Germany) O.Benson's lab (Humboldt Univ. Berlin, Germany) S.Haroche's lab (ENS Paris, France) G.Stephan's lab (ENSSAT, Lannion, France) J. Knight's lab (University of Bath, UK) Y.-P.Laine's lab (Helsinki University of Technology, Finland) A.Serpenguezel's lab (Koc University, Turkey) V.Sandoghdar's lab (ETH Zurich, Switzerland) M.Kuwata's lab (University of Tokyo, Japan) K.Hakuta's lab (University of Electro-Communications Tokyo, Japan)

Прорыв в технологии



2001 ... Городецкий, Ильченко Микроторы. Добротность ~10⁷





2003 ... Ильченко, Савченков, Грудинин, Мацко кристаллические резонаторы в JPL. Добротность до 3×10¹¹

2002 Вахала, Киппенберг. Гибридная технология микроторов. Добротность 2×10⁸

ОПТИЧЕСКИЕ МИКРОРЕЗОНАТОРЫ



Кристаллические микрорезонаторы







(И.С.Грудинин, 2006)

Основные результаты в МГУ

- 1996. Стабилизация частоты полупроводниковых лазеров с помощью микросфер (совместно с ФИАН и NIST).
- 1998. Разработана теория оптимальной связи с микрорезонаторами
- 2000. Теория рассеяния и связи мод в микрорезонаторах
- 2000. Измерение малых оптических потерь в жидкостях методом погруженного сферического микрорезонатора.
- 2004. Экспериментальное измерение фундаментальных оптических флуктуаций в микрорезонаторах.
- 2005. Теоретическое и экспериментальное исследование нестационарных нелинейных эффектов в микросферах.
- 2006. Квазигеометрическая теория мод шепчущей галереи в произвольных осесиметричных резонаторах
- 2007. Собственные частоты и добротность в геометрической теории мод шепчущей галереи

Коммерческие фильтры, модуляторы, СВЧ оптоэлектронные генераторы на основе оптических микрорезонаторов



Те же термодинамические флуктуации



L = 4 км, Q>10¹³ δ*l* ~ 10⁻¹⁶ -10⁻¹⁸ см D ~ 100 мкм, Q>10⁹ V_{eff} ~10⁻⁹ см³, δT ~ 30 мкК δf/f ~ 3×10⁻¹⁰

Спектр терморефрактивных флуктуаций



M.L.Gorodetsky and I.S.Grudinin, JOSA B, 21, 697-705 (2004)

Частотные гребенки

Pulsed Laser



Spence et al, Optics Letters, 16(1):42–44, January 1991, etc...

Nobel Prize Physics 2005: "for their contributions to the development of laser-based precision spectroscopy, including the optical frequency comb technique"



J. Hall Hänsch

Частотный спектр



T.





Применение частотных гребенок

Частотная гребенка может состоять более чем из

- Высокоскоростные линии связи
 - один канал на одну линию
- гребенки
- Прецизионная спектроскопия
 Измерение атомных переходов
- Оптические часы – Точность выше чем у атомных переходов

5

6

17

8

91







Изготовление микроторов







Кварцевая пленка (2 мкм) на кремниевой подложке Кварцевые диски после травления в НF Кварцевые диски на ножках после травления ХеF₂



000278 5.0 kV X803 37.4.m



Микрорезонатор как генератор частотных гребенок

Обычная частотная гребенка

Микротороид

10000 раз меньше

Размер: ~ 1м

Размер: ~100 мкм

30.0kV

x600'''50'

Del'Haye, et al. Nature, 2007





Agha, et al. Opt. Express, 2009







Savchenkov et al. PRL 2008 Grudinin et al. Opt. Letts, 2009





Пример использования: Поиск экзопланет



ESO Очень Большой Телескоп (VLT) в Чили



Спектрометр X-Shooter (Мюнхен)



Спектр гребенки микрорезонатора (расстояние 83 ГГц) на эшелете спектрометра 30

Измерение механических смещений на

квантовом уровне



Резонанс зависит от положения струны: Броуновское движение Переносится в оптический спектр:

$$\delta\omega = \frac{\partial\omega}{\partial x}(x_0)\,\delta x$$



Чувствительность: 0.25 фм/Гц^{1/2}

