

УДК 531.51, 534.08

© Гальченко Л. Д., Тимохин М. В., Митрофанов В. П., 2025

## ИЗМЕРЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ В СОЕДИНЕНИЯХ ЭЛЕМЕНТОВ ПОДВЕСОВ ПРОБНЫХ МАСС КРИОГЕННЫХ ДЕТЕКТОРОВ ГРАВИТАЦИОННЫХ ВОЛН

Гальченко Л. Д.<sup>a,1</sup>, Тимохин М. В.<sup>a,2</sup>, Митрофанов В. П.<sup>a,3</sup>

<sup>a</sup> МГУ им. М.В.Ломоносова, физический факультет, г. Москва, 119991, Россия.

В статье описывается методика исследования механических потерь в слоях из легкоплавких металлов и сплавов, использующихся для соединения элементов подвесов кремниевых пробных масс криогенных лазерных интерферометрических детекторов гравитационных волн. Полученные данные будут использованы при оценке теплового шума пробных масс криогенных детекторов гравитационных волн нового поколения.

*Ключевые слова:* Гравитационные волны, добротность, пробные массы, тепловой шум.

## MEASUREMENT OF MECHANICAL LOSSES IN BONDING BETWEEN COMPONENTS OF TEST MASS SUSPENSIONS IN CRYOGENIC GRAVITATIONAL WAVE DETECTORS

Galchenko L. D.<sup>a,1</sup>, Timokhin M. V.<sup>a,2</sup>, Mitrofanov V. P.<sup>a,3</sup>

<sup>a</sup> Lomonosov Moscow State University, faculty of physics, Moscow, 119991, Russia.

The article describes a method for studying mechanical losses in layers of low-melting metals and alloys used to bond suspension components of silicon test masses in cryogenic laser interferometric gravitational wave detectors. The obtained data will be used to assess the thermal noise of test masses of new-generation cryogenic gravitational wave detectors.

*Keywords:* Gravitational waves, resonator quality factor, test masses, thermal noise.

PACS: 04.80.Nn, 62.40.+i

DOI: 10.17238/issn2226-8812.2025.1.75-78

### Введение

В 2015 году были впервые зарегистрированы гравитационные волны от слияния двух черных дыр [1]. Относительное изменение расстояния между пробными массами – зеркалами интерферометра под действием гравитационных волн имеет порядок  $10^{-22}$ . Для повышения чувствительности детекторов необходимо уменьшать шумы, которые ее ограничивают. Одним из таких шумов является тепловой шум пробных масс. Согласно флуктуационно-диссипационной теореме, тепловой шум уменьшается при понижении температуры и увеличении добротности мод колебаний пробных масс. В современных детекторах пробные массы изготавливаются из плавленого кварца, в котором потери возрастают при охлаждении [2]. В криогенных детекторах нового поколения, таких как Einstein Telescope [3] и LIGO Voyager [4], предполагается использовать монокристаллический кремний. Это позволит уменьшить потери в пробных массах в широком диапазоне температур

<sup>1</sup>E-mail: lidgalo@gmail.com

<sup>2</sup>E-mail: timokhin.mv21@physics.msu.ru

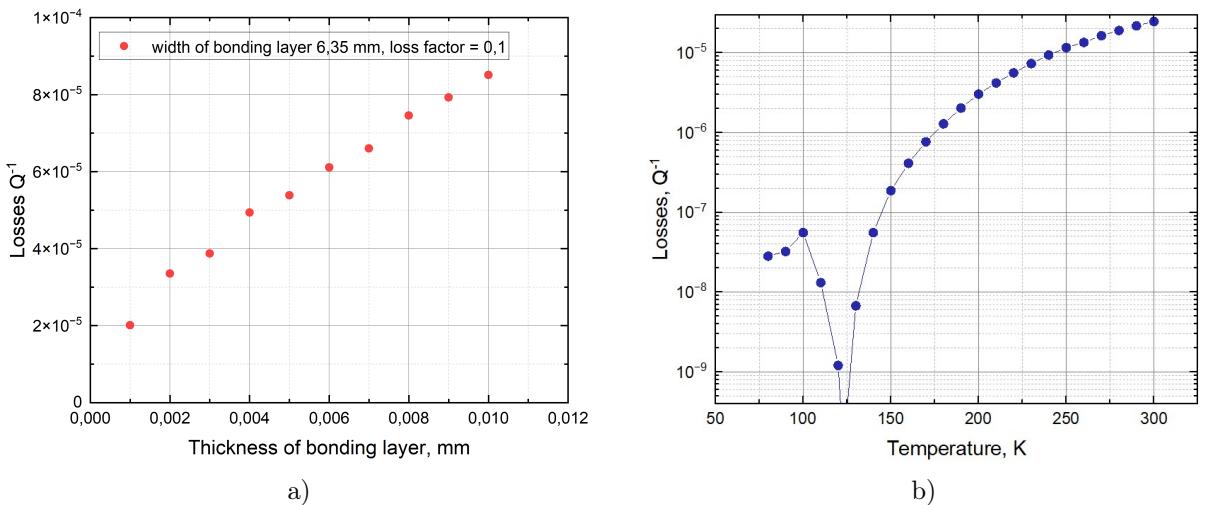
<sup>3</sup>E-mail: vpmitrofanov@physics.msu.ru

[5], а высокая теплопроводность кремния позволит равномерно распределять тепло и уменьшить температурные деформации пробных масс. В отличие от применяемой техники гидроксильного катализа, соединение с использованием легкоплавких металлов, таких как галлий и индий [6], позволяет разъединять соединенные ранее элементы без повреждения самих элементов.

Целью работы является измерение механических потерь в соединениях элементов подвесов кремниевых пробных масс, использующих легкоплавкие металлы и сплавы. Будут исследованы потери составного кремниевого резонатора камертонного типа, части которого соединены легкоплавкими металлами.

## 1. Моделирование составного кремниевого резонатора

В программе COMSOL MULTIPHYSICS было проведено параметрическое исследование модели камертона, созданного из двух стандартных полированных кремниевых дисков диаметром 50.7 мм и толщиной 0.27 мм и прямоугольной кремниевой ножки. Резонансная частота камертона  $f \simeq 200$  Гц. Представлены рассчитанные зависимости потерь в резонаторе от толщины соединительного слоя (Рис. 1 а)) и термоупругих потерь в резонаторе от температуры (Рис. 1 б)).



**Рис. 1.** а) Зависимость потерь в резонаторе от толщины соединительного слоя при потерях в соединительном слое  $\tan \phi = 0,1$ , б) Зависимость термоупругих потерь в резонаторе от температуры

## 2. Методика исследования

Полные потери в резонаторе камертонного типа складываются из потерь, обусловленных различными механизмами:

$$Q_{resonator}^{-1} = Q_{thermoelast.}^{-1} + Q_{material}^{-1} + Q_{surface}^{-1} + Q_{clamping}^{-1} + Q_{gas.damping}^{-1} + Q_{bond.layer}^{-1} \quad (1)$$

Минимизируя потери на газовое трение, потери в креплении и поверхностные потери, а также рассчитав термоупругие потери  $Q_{thermoelast.}^{-1}$ , можно из измеренных потерь в резонаторе  $Q_{resonator}^{-1}$  получить верхнюю границу потерь  $\tan \phi$  в соединительном слое. Для расчета используется следующее выражение [7]:

$$Q_{resonator}^{-1} = Q_{thermoelast.}^{-1} + \tan \phi \cdot \frac{E_{bond.layer}}{E_{resonator}} \quad (2)$$

где  $E_{bond.layer}$  и  $E_{resonator}$  - энергия колебаний в соединительном слое и в резонаторе соответственно.

### 3. Экспериментальная установка

Для измерения потерь в резонаторе и последующей оценки потерь в соединительном слое, необходимо соблюсти указанные выше в разделе “Методика исследования” минимизации. Схема экспериментальной установки представлена на Рис. 2.

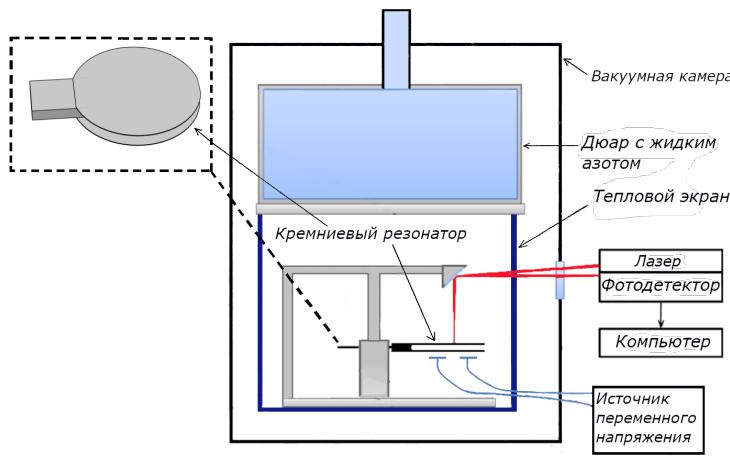


Рис. 2. Схема экспериментальной установки

Колебания резонатора возбуждаются электростатически и регистрируются системой оптического рычага. По сигналу с фотодиода определяется частота  $f$  и время затухания  $\tau$  свободных колебаний резонатора. Механические потери рассчитываются по формуле  $Q_{\text{resonator}}^{-1} = \frac{1}{\pi f \tau}$ . Измерения проводятся при температуре 123 К, при которой термоупругие потери в резонаторе проходят через ноль (Рис. 1 б)).

### Заключение

Разработана методика исследования механических потерь в слоях из легкоплавких металлов и сплавов, использующихся для соединения элементов подвесов кремниевых пробных масс криогенных лазерных интерферометрических детекторов гравитационных волн. В настоящее время разрабатывается метод соединения кремниевых пластин посредством слоя индия с использованием ультразвукового разрушения оксидов кремния и индия. Будут изготовлены составные кремниевые резонаторы с соединением различными легкоплавкими металлами и сплавами, измерена температурная зависимость их добротностей и определен угол механических потерь в соединительных слоях. Полученные данные будут использованы при оценке теплового шума пробных масс криогенных детекторов гравитационных волн нового поколения.

### References

1. B. P. Abbott et al., Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger. *Phys. Rev. Lett.*, 2016. vol. 116, 061102.
2. R. Vacher et. al., Anharmonic versus relaxational sound damping in glasses. II. Vitreous silica. *Phys. Rev. B*, 2005. vol. 72, 214205.
3. A. Grado, Einstein Telescope, the future generation of ground based gravitational wave detectors. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2023. vol. 2429, 012041.
4. R.X. Adhikari et. al., A cryogenic silicon interferometer for gravitational-wave detection. *Class. Quant. Grav.*, 2020. vol. 37, 165003.
5. C. Schwarz, et. al., Mechanical spectroscopy of silicon as a low loss material for high precision mechanical and optical experiments. *Solid State Phenom.*, 2012. vol. 184, pp. 443-448.

6. P.G. Murray, et. al., Low-temperature mechanical dissipation of thermally evaporated indium film for use in interferometric gravitational wave detectors. *Class. Quant. Grav.*, 2015. vol. 32, 115014.
7. L.G. Prokhorov et. al., Upper limits on the mechanical loss of silicate bonds in a silicon tuning fork oscillator. *Phys. Lett. A*, 2018. vol. 382, pp. 2186–2191.

### Авторы

**Гальченко Лидия Дмитриевна**, студент, МГУ им. М.В.Ломоносова, физический факультет, Ленинские Горы, д. 1 стр.2, г. Москва, 119991, Россия.  
E-mail: lidgalo@gmail.com

**Тимохин Матвей Владимирович**, студент, МГУ им. М.В.Ломоносова, физический факультет, Ленинские Горы, д. 1 стр.2, г. Москва, 119991, Россия.  
E-mail: timokhin.mv21@physics.msu.ru

**Митрофанов Валерий Павлович**, профессор, МГУ им. М.В.Ломоносова, физический факультет, Ленинские Горы, д. 1 стр.2, г. Москва, 119991, Россия.  
E-mail: vpmitrofanov@physics.msu.ru

**Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:**

Гальченко Л. Д., Тимохин М. В., Митрофанов В. П. Измерение механических потерь в соединениях элементов подвесов пробных масс криогенных детекторов гравитационных волн. *Пространство, время и фундаментальные взаимодействия*. 2025. № 1. С. 75–78.

### Authors

**Galchenko Lidia Dmitrievna**, student, Lomonosov Moscow State University, faculty of physics, 1-2 Leninskiye Gory, Moscow, 119991, Russia.  
E-mail: lidgalo@gmail.com

**Timokhin Matvey Vladimirovich**, student, Lomonosov Moscow State University, faculty of physics, 1-2 Leninskiye Gory, Moscow, 119991, Russia.  
E-mail: timokhin.mv21@physics.msu.ru

**Mitrofanov Valeriy Pavlovich**, Professor, Lomonosov Moscow State University, faculty of physics, 1-2 Leninskiye Gory, Moscow, 119991, Russia.  
E-mail: vpmitrofanov@physics.msu.ru

**Please cite this article in English as:**

Galchenko L. D., Timokhin M. V., Mitrofanov V. P. Measurement of mechanical losses in bonding between components of test mass suspensions in cryogenic gravitational wave detectors. *Space, Time and Fundamental Interactions*, 2025, no. 1, pp. 75–78.