

УДК 621.366.6

ГРАВИМЕТР НА ОПТИЧЕСКИХ РЕЗОНАТОРАХ С МОДАМИ ШЕПЧУЩЕЙ ГАЛЕРЕИ

И.В. Балакирева

*ФГУП «ВНИИФТРИ», Менделеево, Московская обл., Россия,
balakireva@vniiftri.ru*

Аннотация. В работе приведена схема гравиметра на оптическом резонаторе с модами шепчущей галереи. Приведены результаты компьютерного моделирования чувствительного элемента гравиметра — подвижной консоли — из различных материалов.

Ключевые слова: гравиметр, мода шепчущей галереи.

GRAVIMETER ON OPTICAL RESONATORS WITH WHISPERING GALLERY MODES

I.V. Balakireva

*FSUE “VNIIFTRI”, Mendeleevo, Moscow region, Russia,
balakireva@vniiftri.ru*

Annotation. The paper presents a diagram of a gravimeter based on an optical resonator with whispering gallery modes. The results of computer simulation of a gravimeter sensitive element — a movable console — made of various materials are presented.

Key words: gravimeter, whispering gallery mode.

Введение

Перспективным направлением развития современной навигации является создание систем, основанных на измерении градиента гравитационного поля Земли. Гравитационное поле Земли является стабильным и надёжным ориентиром, который невозможно исказить или перехватить. Для таких систем необходимы чувствительные перевозимые гравиметры, защищённые от других внешних воздействий. Одним из вариантов датчиков гравитационного поля Земли являются устройства с использованием в качестве чувствительного элемента оптических резонаторов с модами шепчущей галереи (далее — МШГ). Целью работы является создание гравиметра на оптических резонаторах с модами шепчущей галереи с увеличенным диапазоном измерения.

МШГ-резонаторы

Чувствительным элементом системы является оптический резонатор с модами шепчущей галереи. Такие резонаторы представляют собой миниатюрные сферы, диски или кольца диаметром от нескольких микрон до нескольких миллиметров [1]. Лазерное излучение вводится в резонатор при помощи

соединительного элемента, например призмы или растянутого оптоволокна. Важной характеристикой микрорезонатора является его добротность, которая характеризует потери в резонаторе. В настоящее время практически достижимая добротность резонаторов составляет 10^8-10^9 [2]. Внутренняя добротность Q_{in} характеризует потери внутри резонатора и на границе резонатора с окружающей средой. Добротность соединения Q_{ext} зависит, в первую очередь, от расстояния между резонатором и соединительным элементом (рис. 1а). Общая добротность Q_{tot} резонатора включает и внутреннюю, и внешнюю добротности:

$$\frac{1}{Q_{tot}} = \frac{1}{Q_{in}} + \frac{1}{Q_{ext}}. \quad (1)$$

Добротность соединения зависит от радиуса резонатора r , длины волны накачки λ , индекса преломления n , радиального номера моды q и, конечно же, расстояния между резонатором и соединительным элементом d [4]:

$$Q_{ext}(d) = 102 \left(\frac{r}{\lambda} \right)^{5/2} \frac{n^3 (n^2 - 1)}{4q - 1} e^{d(4\pi/\lambda)\sqrt{n^2 - 1}}. \quad (2)$$

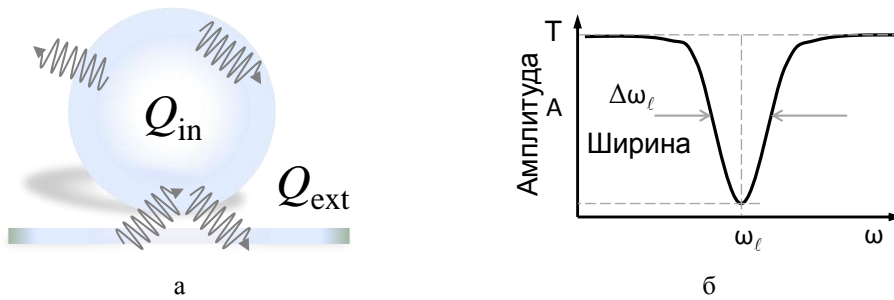


Рис. 1. Микрорезонатор с соединительным элементом (а): Q_{in} — внутренняя добротность микрорезонатора; Q_{ext} — добротность соединения. Характеристики моды резонатора (б): A — амплитуда; $\Delta\omega_\ell$ — ширина; ω_ℓ — центральная частота моды; ℓ — номер моды

Мода резонатора

Основными характеристиками моды резонатора являются её центральная частота ω , амплитуда A и ширина $\Delta\omega_\ell$ (рис. 1б) [3]. Ширина и амплитуда моды зависят от добротности резонатора [4]:

$$\Delta\omega = \frac{\omega(Q_{in} + Q_{ext})}{Q_{in}Q_{ext}}, \quad (3)$$

$$\Delta A = \frac{4Q_{in}Q_{ext}(d)\Gamma^2}{(Q_{in} + Q_{ext}(d))^2}. \quad (4)$$

Как видно из (3) и (4), ширина и амплитуда моды будут изменяться при изменении добротности резонатора (рис. 2), то есть по изменению параметров моды, наблюдаемых на выходе резонатора, можно высчитать расстояние между резонатором и соединительным элементом.

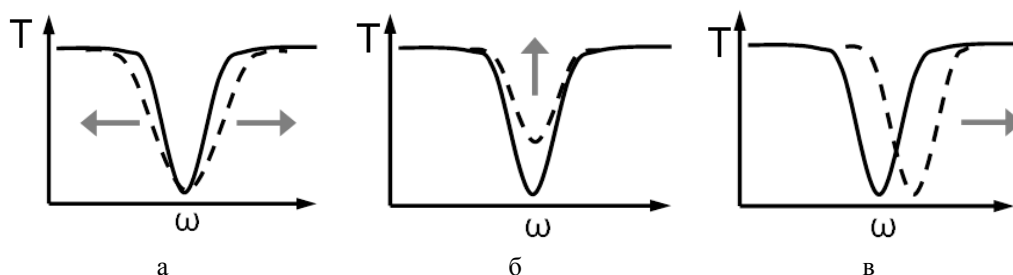


Рис. 2. Возможные изменения моды: уширение или сужение моды (а); изменение амплитуды моды (б); сдвиг моды (в)

Оптический гравиметр

Чувствительным элементом гравиметра является оптический микрорезонатор, размещённый на подвижной консоли. Соединительный элемент расположен на неподвижной платформе на некотором расстоянии d_0 от резонатора. При изменении гравитации консоль сгибается, приближая резонатор к соединительному элементу, или разгибается, удаляя резонатор от него, при этом расстояние между резонатором и соединительным элементом изменяется пропорционально приложенному ускорению свободного падения: $d = d_0 + \Delta d$. В результате мода резонатора меняет свои амплитуду и частоту (рис. 2). По изменениям моды резонатора на регистрирующем устройстве вычисляется изменение расстояния между резонатором и соединительным элементом и, соответственно, приложенное ускорение свободного падения.

У такой конструкции есть ограничения по диапазону измерения, поскольку при отдалении резонатора от соединительного элемента происходит потеря связи, также необходимо избегать касания резонатора с соединительным элементом, при котором возможна их деградация или разрушение.

Такую конструкцию устройства в 2001 году представили Ж.-П. Лайн и др. [4]. Учёные не измеряли ускорение свободного падения, а изменяли расстояние между резонатором и соединительным элементом, измеряя ширину и амплитуду моды. Лабораторная установка акселерометра имеет измеренную чувствительность 1 мГал на ширине полосы 250 Гц. Похожая конструкция была продемонстрирована и в 2008 году [5, 6]. Лабораторные установки были стационарными, исследования измерений непосредственно ускорения свободного падения не проводились.

Предлагается следующая конструкция оптического гравиметра (рис. 3). Основными элементами также являются МШГ-резонатор на подвижной консоли и соединительный элемент, через который вводится и выводится лазерное излучение. В конструкцию добавляется элемент перемещения консоли (например, пьезоэлемент) для того, чтобы увеличить диапазон измерения и избежать потери связи и касания резонатора и соединительного элемента. После измерения моды резонатора, в случае опасного приближения резонатора к соединительному элементу или его чрезмерного отдаления, контроллер даёт сигнал пьезоэлементу на поднятие/опускание консоли. Сигнал с контроллера поступает на процессор, в котором происходит расчёт ускорения свободного падения с учётом перемещения консоли и изменения моды резонатора. Таким образом существенно увеличивается диапазон измерения, делая прибор пригодным для измерения гравитации, в том числе на других планетах.

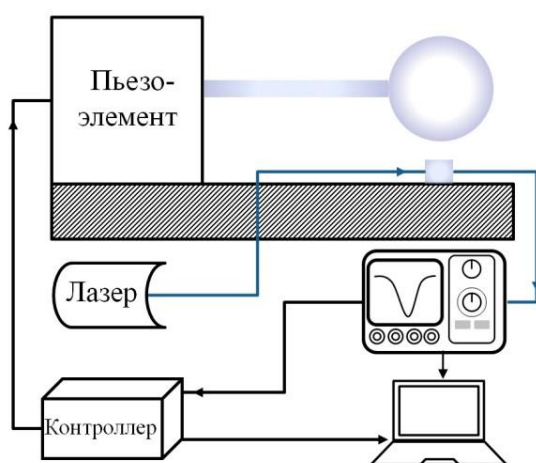


Рис. 3. Схема оптического гравиметра

Подвижная консоль

Самым важным элементом оптического гравиметра является подвижная консоль. Она должна быть достаточно гибкой для того, чтобы реагировать на малейшие изменения ускорения свободного падения, но в том числе она не должна прогибаться под весом резонатора настолько, чтобы сделать измерения невозможными.

Подвижная консоль подбирается при учёте следующих параметров: диаметр, длина, материал и возможные слои различных материалов. Стоит задача по подбору оптимальных параметров консоли для резонаторов различных масс. Также остаётся открытым вопрос о потенциальной чувствительности гравиметра, поскольку ранее не проводились измерения с учётом прогиба консоли.

Мы провели сравнение подвижных консолей из двух материалов: стандартного в оптике SiO_2 и мягкого органического стекла полиметилакрилата (рис. 4). Компьютерное моделирование проводилось в программе COMSOL Multiphysics. На рис. 4 прогиб консоли виден для обоих материалов, но для SiO_2 перемещение составляет всего 0,65 нм при изменении гравитации от 9,7 до 10 м/с^2 .

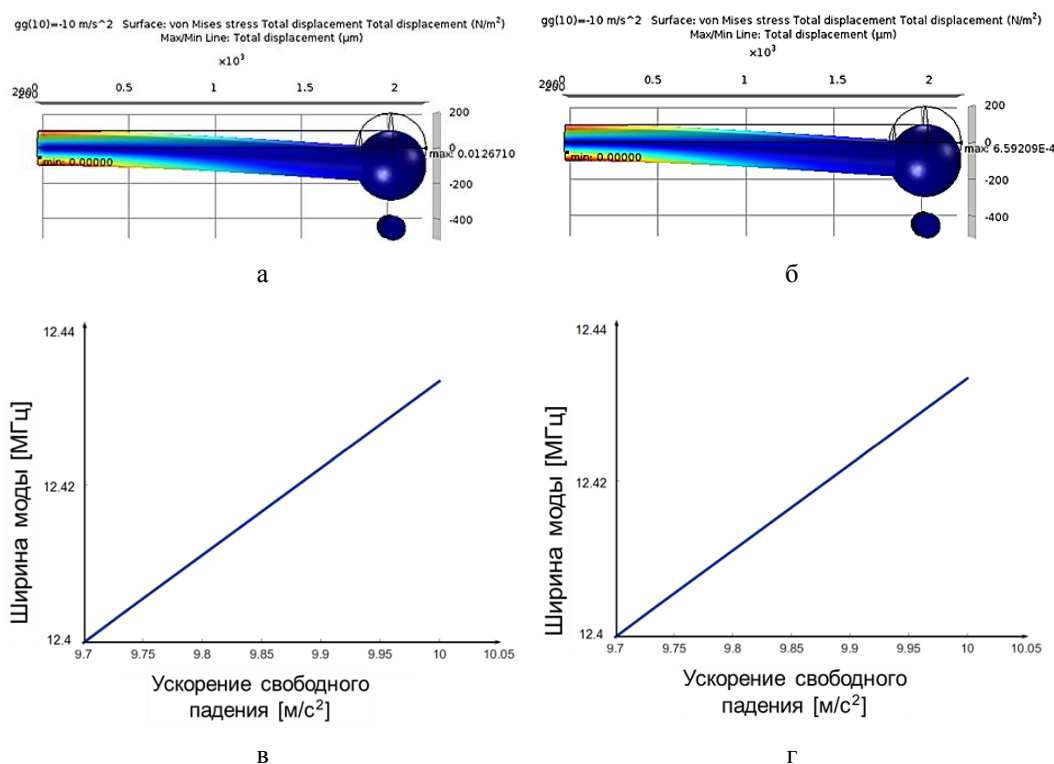


Рис. 4. Результат компьютерных симуляций прогиба консоли из полиметилакрилата (а) и SiO_2 (б) и соответствующие им изменения ширины моды резонатора (в, г). Диаметр резонаторов — 200 мкм, длина консоли — 2 мм, диаметр консоли — 100 мкм

На рис. 4в, г представлены результаты расчёта изменения ширины моды резонатора от изменения ускорения свободного падения. Как видно из графиков, для определения ускорения свободного падения при помощи консоли из полиметилакрилата необходимо измерить изменения ширины моды резонатора в десятки кГц, тогда как для консоли из SiO_2 — в единицы кГц. Это означает, что подбором материала консоли можно существенно увеличить чувствительность устройства, например, в приведённых примерах чувствительность увеличилась в 10 раз.

Выводы

В работе показана схема оптического гравиметра на МШГ-резонаторах, позволяющая существенно расширить диапазон измерений и предотвратить повреждение устройства при перемещении или воздействии вибраций. Произведено компьютерное моделирование прогиба подвижной консоли из материалов разной твёрдости. Показано, что подбор подходящего материала консоли позволяет существенно повысить чувствительность устройства, приведены материалы, для которых чувствительность гравиметра отличается в 10 раз.

Список литературы

1. Strekalov D.V., Marquardt C., Matsko A.B., Schwefel H.G.L., Leuchs G. Non-linear and quantum optics with whispering gallery resonators // *Journal of Optics*. — 2016. — V. 18. — No. 12. — 123002.
2. Shitikov A.E., Bilenko I.A., Kondratiev N.M., Lobanov V.E., Markosyan A., Gorodetsky M.L. Billion Q-factor in silicon WGM resonators // *Optica*. — 2018. — V. 5. — I. 12. — P. 1525–1528.
3. Oraevsky A.N. Whispering-gallery waves // *Quantum Electronics*. — 2002. — V. 32. — No. 5. — P. 377–400.
4. Laine J.-P., Tapalian C., Little B., Haus H. Acceleration sensor based on high-Q optical microsphere resonator and pedestal antiresonant reflecting waveguide coupler // *Sensors and Actuators A: Physical*. — 2001. — V. 93. — No. 1. — P. 1–7.
5. Li Y.L., Barker P.F. Field Evaluation of a Portable Whispering Gallery Mode Accelerometer // *Sensors*. — 2018. — V. 18. — 4184.
6. Li Y.L., Barker P.F. Field Evaluation of a Portable Whispering Gallery Mode Accelerometer // *Journal of Lightwave Technology*. — 2018. — V. 36(18). — 3919.

Статья поступила в редакцию: 02.11.2021 г.

Статья прошла рецензирование: 09.11.2021 г.

Статья принята в работу: 16.11.2021 г.