

ФИЗИКА ТВЕРДОГО ТЕЛА

УДК 539.213.2

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИССИПАЦИИ В КРУТИЛЬНЫХ МОДАХ
ОСЦИЛЛЯТОРОВ НА ТОНКИХ НИТЯХ ИЗ ПЛАВЛЕННОГО
КВАРЦА

И. А. Биленко С. Л. Лурье

(кафедра физики колебаний)

E-mail: igor@hbar.phys.msu.su

В высокочувствительных экспериментах с пробными телами планируется использование в качестве подвесов тонких кварцевых нитей с малыми собственными потерями. В настоящей работе приводятся результаты измерений потерь в нитях диаметром от 1.5 до 19 мкм. Полученные результаты указывают на увеличение вклада поверхностных потерь при уменьшении диаметра.

Введение

Для достижения максимального уровня чувствительности в экспериментах по измерению малых механических сил, перемещений и ускорений необходимо использовать подвесы пробных тел, обладающие низким уровнем собственных механических шумов. Примерами таких экспериментов являются обнаружение гравитационных волн (проект LIGO, VIRGO и др. [1]) и преодоление стандартного квантового предела [2] в механических измерениях. В обоих случаях пробные тела подвешиваются на тонких нитях так, чтобы частота маятниковой моды колебаний подвеса была существенно ниже диапазона частот, в котором ведутся измерения. Согласно флуктуационно-диссипационной теореме, влияние неустраимых тепловых флуктуаций в подвесе можно снизить, повышая добротность всех его механических мод. При достаточно высокой величине добротности возможно обнаружение квантового поведения механических осцилляторов при соблюдении условия

$$\frac{kT}{2\omega Q} < \hbar,$$

где k — постоянная Больцмана, T — температура, ω — собственная частота осциллятора, Q — добротность. Для кварцевых нитей диаметром $d \sim 100$ мкм (материал — Suprasil 312) были получены рекордные значения механической добротности струнных, маятниковых и изгибных мод колебаний (для последних $Q \simeq 3 \cdot 10^7$ [3]). В недавних исследованиях [4, 5] было показано, что в тонких нитях ($d < 10$ мкм) эти величины существенно ниже из-за влияния поверхностных потерь.

Целью данной работы было непосредственное измерение угла механических потерь в тонких кварцевых нитях и исследование его зависимости от диаметра посредством измерения времени релаксации крутильных колебаний маятника.

Если Q и τ^* — добротность и время релаксации крутильных колебаний высокодобротного маятника, совершаемых в горизонтальной плоскости, то угол механических потерь определяется как

$$\phi \simeq tg\phi = Q^{-1} = \frac{T}{\pi \tau^*}.$$

Благодаря наличию на поверхности свободных валентных электронов кремния к поверхностному слою плавленого кварца активно присоединяются гидроксильные группы и кислород из атмосферы, на поверхности также возможно появление царапин и микротрещин, что является причиной возникновения дополнительных потерь. В работе [4] было показано, что в области $40 \text{ мкм} \leq d \leq 3 \text{ мм}$ $\phi(d)$ хорошо описывается следующей эмпирической зависимостью:

$$\phi(d) = 3.5 \cdot 10^{-8} \left(1 + \frac{1.336 \cdot 10^{-3} \text{ м}}{d} \right). \quad (1)$$

В работе [5] были исследованы маятниковая и струнная моды колебаний в диапазоне $1.5 \text{ мкм} \leq d \leq 40 \text{ мкм}$ и показано, что соотношение (1) с учетом маятникового и струнного выигрыша хорошо выполняется также для $5 \text{ мкм} \leq d \leq 40 \text{ мкм}$, но для $d < 5 \text{ мкм}$ угол механических потерь растет быстрее, чем можно было бы ожидать при экстраполяции (1) в область меньших диаметров.

В настоящей работе исследуется зависимость $\phi(d)$ в пределах $d = 1.5 \div 40$ мкм для крутильных колебаний.

Эксперимент

Для измерения времени релаксации крутильных колебаний была собрана конструкция, состоящая из крутильного маятника, электростатической системы возбуждения колебаний и печки, используемой для прогрева нити с целью удаления присоединенной к поверхности воды (рис. 1). Маятник представлял из себя кварцевое зеркало массой около 250 мг,

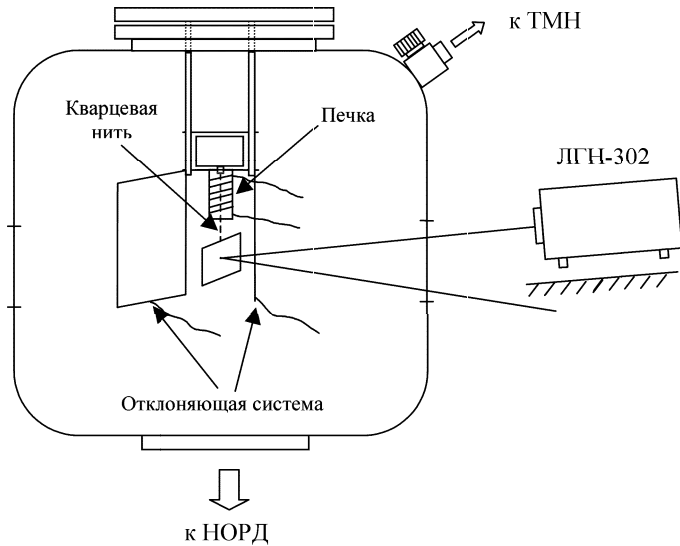


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

подвешенное на исследуемой кварцевой нити, изготовленной из кварца Suprasil 312. Регистрация угла отклонения маятника от положения равновесия проводилась по смещению отраженного от зеркала луча лазера.

Для изготовления тонких нитей из расплавленного кварца была использована технология вытягивания из нитей-заготовок (диаметром от 11 до 15 мкм), описанная в [7]. Кварцевые нити приваривались к массивному кварцевому блоку (масса $M_0 \approx 600$ г), который в свою очередь жестко крепился к верхней части вакуумной камеры массой ≈ 130 кг. Такое крепление снижает потери отдачи, вызванные утечкой энергии механических колебаний в подвес кварцевой нити.

Измерения проводились в вакууме при давлении не более 10^{-7} торр. Для того чтобы загрязнение и гидратация поверхности образцов были минимальными, нити сразу после изготовления помещались в вакуумную камеру и откачивались турбомолекулярным насосом (ТМН) до давлений $10^{-3} - 10^{-4}$ торр таким образом, что время их нахождения в атмосферном воздухе составляло несколько минут. Рабочий вакуум достигался с использованием ионизационного насоса (НОРД) примерно через сутки после помещения образцов в камеру.

Особое внимание было уделено влиянию электрического заряда, находящегося на поверхности груза. Было проведено несколько экспериментов, в ходе которых измерялись угол отклонения от равновесия в одном и том же электрическом поле и время релаксации до и после специальной обработки поверхности зеркала летучими веществами (ацетоном, спиртом), значительно снижающей поверхностную плотность электрического заряда. Было показано, что начальная амплитуда колебаний, прямо пропорциональная величине поверхностного заряда, уменьшается после обработки в несколько раз, а период крутильных колебаний не меняется. Поскольку в ходе обработки кварцевые нити в течение несколь-

ких часов находились на воздухе, их добротности значительно уменьшались. Поэтому после обработки образцы прогревались в вакууме при температуре более 300°C в течение двух часов. Добротности после прогрева становились равными исходным значениям в пределах погрешности измерений. Аналогичная картина изменения механической добротности при длительном нахождении кварцевых нитей на воздухе и последующем прогреве наблюдалась в работе [6].

На рис. 2 приведены результаты измерений ϕ для 10 образцов диаметром от 1.5 до 19 мкм, экстраполяция эмпирической зависимости (1) и предлагаемый вариант эмпирической зависимости, содержащий член порядка $1/d^2$. Видно, что начиная с 5 мкм угол механических потерь растет сильнее с уменьшением диаметра, нежели можно было бы ожидать при экстраполяции соотношения (1) в область диаметров менее 40 мкм.

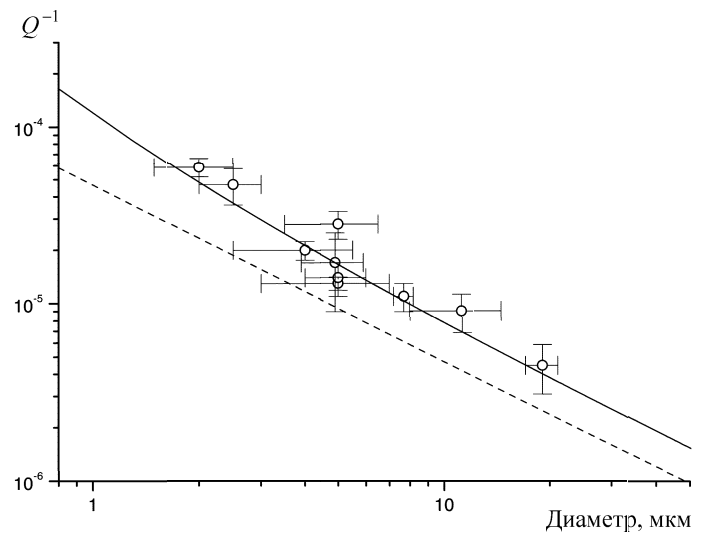


Рис. 2. Зависимость угла механических потерь от диаметра кварцевой нити. Кружки — экспериментальные данные; штриховая линия — аппроксимация Gretarsson & Harry: $\phi = 3.5 \cdot 10^{-8}(1 + 1.336 \cdot 10^3 m/d)$; сплошная линия: $\phi(d) = 3.5 \cdot 10^{-8}(1 + 1.336 \cdot 10^3 m/d + 2.1 \cdot 10^3 m^2/d^2)$

Заключение

Исследована зависимость угла механических потерь для крутильных мод колебаний тонких кварцевых нитей от диаметра в диапазоне от 1.5 до 19 мкм. Показано, что начиная с 5 мкм влияние поверхностных потерь с уменьшением диаметра становится сильнее, чем предполагалось ранее. Достигнутый уровень добротности $Q \approx (1.7 \pm 0.2) \cdot 10^4$ и время релаксации $\tau^* \approx (2.7 \pm 0.3) \cdot 10^5$ с для кварцевых нитей диаметром $d \sim 1.5$ мкм позволяют использовать их в различных прецизионных измерениях, в частности в схеме, предложенной в [2] при $\omega > 2\pi \cdot 1.5$ кГц.

Авторы выражают благодарность проф. В. Б. Брагинскому и проф. В. П. Митрофанову за полезные советы и замечания.

Литература

1. *Barish B., Weiss R.* // Phys. Today. 1999. **52**. P. 44.
2. *Braginsky V.B., Khalili F. Ya., Volikov P.S.* // Phys. Lett. A. 2001. **287**. P. 31.
3. *Willems P., Sannibale V., Weel J., Mitrofanov V.* // Phys. Lett. A. 2002. **297**. P. 37.
4. *Gretarsson A.M., Harry G.M.* // Rev. Sci. Instr. 1999. **70** (10). P. 4081.
5. *Bilenko I.A., Lourié S.L.* // Classical and Quantum Gravity. 2004. **21**. P. 1231.
6. *Mitrofanov V.P., Tokmakov K.V.* // Phys. Lett. A. 2003. **308**. P. 212.
7. *Стронг Д.* // Введение в технику эксперимента. М., 1947.

Поступила в редакцию