

УДК 534.013:534.113

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАТУХАНИЯ И ШУМОВОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ
КРУТИЛЬНЫХ МИКРОМАЯТНИКОВ**

В. П. Митрофанов, О. И. Пономарева

(кафедра физики колебаний)

Для крутильных микромаятников с кварцевой нитью подвеса диаметром от 1 до 10 мкм выявлены закономерности изменения их добротности в зависимости от диаметра нити, частоты, температуры и других параметров; измерена шумовая температура маятника.

Широко распространенный и наиболее чувствительной системой для измерения малых сил является крутильный маятник [1]. Минимальная обнаруживаемая по его отклику сила определяется тепловым шумом и в соответствии с формулой Найквиста, примененной к механическим системам, зависит от коэффициента трения H этого маятника. Прямым путем уменьшения коэффициента трения колебательной системы является уменьшение ее жесткости и соответственно массы, а также повышение добротности, т. е. создание высокодобротных микромаятников. С другой стороны, в эксперименте основным возмущающим фактором, препятствующим достижению потенциальной чувствительности, обычно является сейсмический шум. Он представляет собой случайные колебания точки подвеса маятника, вызывающие флуктуации амплитуды его колебаний. Уравнение движения крутильного маятника с учетом флуктуационных воздействий можно записать в виде уравнения Ланжевена [2]

$$J\ddot{\varphi} + H\dot{\varphi} + K\varphi = M_{\varphi T} + M_{\varphi S}, \quad (1)$$

где φ — угол поворота маятника; J , K — его момент инерции и крутильная жесткость; $M_{\varphi T}$ и $M_{\varphi S}$ — моменты сил Ланжевена, первый описывает воздействие тепловых шумов, второй — сейсмических.

Спектральная плотность ланжевенского источника тепловых флуктуаций дается формулой Найквиста

$$G_T(\omega) = \frac{1}{2} \kappa T H. \quad (2)$$

Здесь κ — постоянная Больцмана, T — температура.

Спектральная плотность источника сейсмических шумов может быть выражена через спектральную плотность угловых ускорений точки подвеса $G_{\ddot{q}}(\omega)$, которая обычно измеряется экспериментально:

$$G_S(\omega) = J^2 G_{\ddot{q}}(\omega). \quad (3)$$

В отличие от теплового сейсмический шум не является белым шумом. Но если учесть, что для линейного осциллятора существенны составляющие спектра, расположенные в узкой полосе вблизи его резонансной частоты, тогда сейсмический шум, воздействующий на маятник, можно заменить эквивалентным белым шумом со спектральной плотностью, равной спектральной плотности сейсмического шума на резонансной частоте маятника. В этом случае влияние сейсмических

шумов формально можно характеризовать величиной эквивалентной шумовой температуры T_N :

$$T_N = \frac{\pi J G_{\Omega}(\omega) Q}{\kappa \omega}. \quad (4)$$

Выражение (4) получено из сопоставления уравнений (2) и (3). Коэффициент трения H выражен через параметры маятника, собственную частоту ω и добротность Q :

$$H = J \omega / Q.$$

Из формул (2) и (3) следует, что уменьшение момента инерции маятника приводит к снижению как теплового, так и сейсмического шума, т. е. к уменьшению величины предельной регистрируемой силы. При этом тепловой шум может стать определяющим. Дальнейшее повышение чувствительности достигается увеличением добротности маятника.

Такие маятники, или микроосцилляторы, как их можно назвать, должны иметь нить подвеса диаметром около микрона и коромысло с моментом инерции 10^{-5} – 10^{-3} г·см². Для регистрации их колебаний удобно использовать оптический метод как обеспечивающий минимальное динамическое и флуктуационное влияние датчика на осциллятор. Была разработана технология изготовления микромаятников из плавленного кварца. Нить подвеса вытягивалась методом лазерного нагрева [3]. Такая процедура позволяла получать нити заданного диаметра с минимальным загрязнением поверхности. На концах нити образовывались плавные переходы с утолщением, удобные для закрепления.

Были проведены исследования с целью выяснения предельных минимальных значений коэффициента трения, которые могут быть достигнуты для таких маятников. Маятники помещались в вакуумную камеру при давлении 10^{-5} мм рт. ст. При этом потери на газовое трение были пренебрежимо малы и затухание колебаний определялось в основном потерями в материале нити подвеса.

Следует отметить, что затухание упругих колебаний в плавленном кварце обычно исследовалось в области звуковых и ультразвуковых частот. В этом диапазоне плавленный кварц обладает при комнатной температуре достаточно малыми потерями: $Q^{-1} \approx 10^{-6}$.

Приведем наиболее характерные экспериментальные факты, полученные в данной работе. На рис. 1 показана зависимость величины затухания колебаний крутильных маятников с близкими собственными частотами ($f_0 = 0,05$ Гц) от диаметра нити подвеса. Наблюдается значительное увеличение затухания при уменьшении диаметра нити от 7 до 1 мкм.

Интерес представляет исследование потерь в кварцевых маятниках при изменении температуры. Для проведения таких измерений маятник помещался в откачиваемую стеклянную трубку, которая опускалась либо в гелиевый криостат с оптическими вводами, либо в специальную печь. Измерения проводились в режиме естественного охлаждения или нагревания маятника. Характерная температурная зависимость затухания приведена на рис. 2. В диапазоне температур от комнатной до 350 К наблюдается неоднозначная зависимость добротности от температуры. В процессе охлаждения затухание маятника имеет меньшую величину, чем в процессе нагревания (пунктирная кривая). После проведения цикла нагревания и обратного охлаждения до комнатной температуры добротность маятника увеличивалась, но впослед-

ствии через несколько часов она постепенно восстанавливалась до первоначального значения при комнатной температуре. При охлаждении от комнатной до азотной температуры наблюдается экспоненциальное уменьшение затухания. При температуре около 20 К существует пик затухания колебаний, имеющий релаксационный характер.

Отметим некоторые закономерности, полученные в результате измерения затухания колебаний для различных маятников, изготовлен-

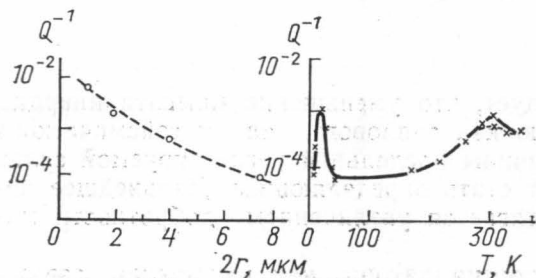


Рис. 1

Рис. 2

ных на основе одной и той же кварцевой нити и имеющих один и тот же момент инерции, а следовательно, и частоту, но отличающихся массой, т. е. натяжением в нити подвеса. С увеличением в определенных пределах нагрузки затухание колебаний маятника уменьшается. Такой эффект наблюдался на всех исследованных нитях диаметром от 2 до 5 мкм. Наблюдалось также

падение добротности маятника при уменьшении собственной частоты колебаний.

Из изложенных экспериментальных данных можно сделать вывод о том, что в кварцевых микромаятниках основным источником потерь упругой энергии является поверхностный слой нити подвеса. Поверхностный слой покрыт буграми и трещинами, насыщен адсорбированными молекулами и атомами других веществ. Под действием упругих деформаций в нем возникают необратимые процессы диффузии основного вещества и адсорбированных атомов, приводящие к диссипации упругой энергии. Если поглощение энергии связано с процессом диффузии, то оно носит релаксационный характер. В случае простого релаксационного процесса, который характеризуется одним определенным временем релаксации τ , затухание описывается следующим выражением [4]:

$$Q^{-1} = \frac{K_U - K_R}{K_U} \frac{\omega\tau}{1 + \omega^2\tau^2}, \quad (5)$$

где K_U и K_R — соответственно нерелаксирующий и релаксирующий крутильные модули, ω — собственная частота колебаний.

Точный расчет разности упругих модулей провести не удастся, так как отсутствует более или менее адекватная модель поверхности кварцевой нити. Однако можно получить оценки этой величины из самых общих предположений. Благодаря высокой подвижности атомов, расположенных на поверхности, упругие напряжения в поверхностном слое, возникающие при колебаниях маятника, релаксируют достаточно быстро. В случае полной релаксации эквивалентная крутильная жесткость нити уменьшается так, как если бы этот слой вообще не вносил вклад в нее. Поэтому в качестве оценки величины разности нерелаксирующего и релаксирующего модулей можно взять жесткость кольцевого слоя с радиусом, равным радиусу нити R , и толщиной ΔR , равной толщине монослоя атомов на ее поверхности ($\sim 3 \cdot 10^{-10}$ м):

$$K_U - K_R \approx 3\pi G R^3 \Delta R / 2, \quad (6)$$

где G — модуль сдвига. Тогда $(K_U - K_R) / K_R \approx 3\Delta R / R$, т. е. для кварце-

вой нити диаметром 2 мкм относительное изменение крутильного модуля равно $\sim 10^{-3}$.

Конечно, процесс релаксации упругих напряжений в поверхностном слое реально описывается не одним значением τ , как в уравнении (5), а спектром времен релаксации. Однако можно оценить характерную частоту спектра из уравнения диффузии, выбирая в качестве диффузионной длины диаметр нити подвеса $2R$. Тогда получаем

$$\tau = 4R^2/D, \quad (7)$$

где D — коэффициент поверхностной диффузии. Если предположить, что для исследуемых осцилляторов основная часть спектра времен релаксации лежит в области $\omega\tau \gg 1$, а следовательно, $Q^{-1} \sim (\omega\tau)^{-1}$, что подтверждается экспериментом, то получаем значение величины $D \leq 10^{-9}$ см²/с при комнатной температуре, характерное для поверхностной диффузии [5]. Тогда экспоненциальное уменьшение затухания колебаний маятника при охлаждении ниже комнатной температуры связано с температурным изменением коэффициента диффузии. Пик затухания, наблюдающийся при температуре около 20 К, аналогичен тем, которые наблюдались в плавленом кварце на звуковых частотах. Он обусловлен процессами структурной релаксации в плавленом кварце и принципиально неустраним [6].

Сложнее объяснить поведение затухания колебаний маятника при нагревании выше комнатной температуры. По-видимому, процессы десорбции молекул в поверхностном слое начинают конкурировать с поверхностной диффузией, изменяется также спектр времен релаксации. Внутреннее трение оказывается чувствительным к структуре нити и ее поверхностного слоя, что приводит к зависимости добротности маятника от величины натяжения нити подвеса.

На основании проведенных исследований были созданы крутильные микромаятники, обладающие чрезвычайно малым коэффициентом трения. Так, для маятника с нитью подвеса диаметром 2 мкм и собственной частотой 0,2 Гц значение величины коэффициента трения составило $1,5 \cdot 10^{-8}$ г·см²/с при комнатной температуре и $2 \cdot 10^{-9}$ г·см²/с при $T=78$ К.

Для достижения минимальной шумовой температуры микромаятников необходим оптимальный выбор их параметров. В реальном эксперименте кроме случайных поворотов точки подвеса существенными являются ее сейсмические горизонтальные и вертикальные смещения, которые возбуждают случайные крутильные колебания через маятниковые моды. Уменьшение влияния маятниковых мод достигается оптимальным выбором положения точки подвеса коромысла относительно его центра тяжести и тщательной балансировкой коромысла маятника. Измерения шумовой температуры проводились в ночное время, но без специальной антисейсмической защиты. Для маятника с собственной частотой 0,05 Гц с крутильной жесткостью $1,5 \cdot 10^{-3}$ дин·см среднеквадратичное значение амплитуды колебаний составляло $1,8 \cdot 10^{-5}$ рад, чему соответствует эквивалентная шумовая температура 1500 К и минимальная обнаруживаемая сила $2,5 \cdot 10^{-11}$ дин при времени измерения $3,6 \cdot 10^3$ с.

Авторы благодарят В. Б. Брагинского за полезные обсуждения и внимание к работе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Брагинский В. Б., Манукин А. Б. Измерение малых сил в физических экспериментах. М., 1974. [2] Климонтович Ю. Л. Статистическая физика.

М., 1982. [3] Митрофанов В. П., Пономарева О. И., Хорев А. А. // ЖТФ. 1985. № 5, № 4. С. 765—767. [4] Новик А., Берри Б. Релаксационные явления в кристаллах. М., 1975. [5] Гегузин Я. Е., Кагановский Ю. С. Диффузионные процессы на поверхности кристалла. М., 1984. [6] Anderson O., Bömmel H. // J. Amer. Cer. Soc. 1955. 38. P. 125—131.

Поступила в редакцию
12.05.86

ВЕСТН. МОСК. УН-ТА. СЕР. 3. ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ. 1987. Т. 28, № 5

ОПТИКА И СПЕКТРОСКОПИЯ

УДК 535.417:531.7.08

АВТОМАТИЧЕСКАЯ СТАБИЛИЗАЦИЯ БАЗЫ ДИАГНОСТИЧЕСКОГО ИНТЕРФЕРОМЕТРА

В. А. Дорезюк, В. И. Шмальгаузен

(кафедра общей физики и волновых процессов)

Исследуется система активной стабилизации базы диагностического интерферометра Тваймана—Грина с управляемым по положению (при помощи пьезокерамического привода) зеркалом в опорном плече.

1. Введение. В настоящее время для измерения параметров сред и исследования поверхностей широко применяется интерферометрическая техника.

Высокая чувствительность интерферометрической аппаратуры приводит к необходимости защиты ее от различного рода помех: вибрации, тепловых отклонений и т. д. Стандартные методы борьбы с помехами сводятся в основном к созданию сложной системы подвесок, подушек, к установке интерферометров в подвальных этажах зданий и т. п. Эти способы не всегда приемлемы, дороги и зачастую малоэффективны, что и привело к интенсивному развитию методов активной стабилизации, которые подразумевают создание цепи обратной связи, замыкающейся обычно при помощи электронных устройств. При отклонении от положения стабилизации эти устройства вырабатывают сигнал управления, который подается на активный оптический элемент, корректирующий волновой фронт нужным образом. В качестве такого элемента обычно используются управляемые зеркала с пьезоэлектрическим [1; 2] или электродинамическим [3] приводом. В большинстве случаев это небольшие по размерам и легкие конструкции. Для целей же диагностической интерферометрии требуются высококачественные зеркала с большой апертурой. Такие зеркала обычно массивны и имеют низкую резонансную частоту. Поэтому включение их в контур замкнутой следящей системы в качестве исполнительного устройства может в значительной степени изменить вид амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) контура и вывести систему из области устойчивости. Для обеспечения устойчивой работы в этих случаях необходима коррекция АЧХ контура.

В данной работе описана система активной стабилизации диагностического интерферометра Тваймана—Грина (рис. 1) с управляемым по положению (при помощи пьезоэлектрического привода) зеркалом в опорном плече и приводятся результаты экспериментов с системой.