

компоненты вектора поляризации на разные направления, но и разность фаз акустических волн и тем самым получить исчерпывающую информацию о характеристиках эллипсов поляризации.

Обычно при величине магнитного поля 5 кГс потери на преобразование составляли около 100 дБ. Такая большая величина потерь на преобразование обусловлена малой величиной колебательного смещения проводящих элементов поверхности под действием акустической волны и является одним из главных недостатков электро-

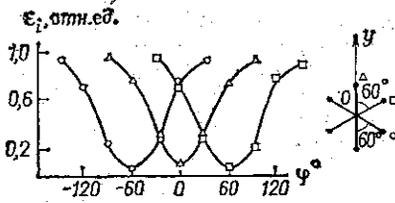


Рис. 1. График зависимости э. д. с. на электродах, напыленных на торец плавленого кварца, от угла поворота плоскости поляризации линейно-поляризованной сдвиговой волны

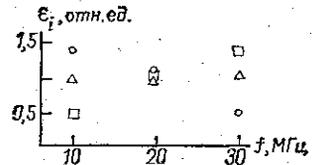


Рис. 2. Э. д. с. на электродах электродинамического преобразователя, напыленных на α-кварц, при разных частотах акустической волны

динамического метода, препятствующих его широкому использованию в практических устройствах. Но для лабораторных исследований этот метод является вполне приемлемым и обладает по сравнению с другими целым рядом преимуществ, к которым можно добавить и возможность определения состояния поляризации сдвиговой волны.

ЛИТЕРАТУРА

1. Михайлов И. Г., Шутилов В. А. «Акустический журнал», 1964, 10, 98.
2. Качалов Н. П., Лямов В. Е., Солодов И. Ю. «Вестн. Моск. ун-та. Физ., астрон.», 1971, 12, № 6, 729.
3. Kajimiga K., Inaba R., Mikoshiba N., «Appl. Phys. Lett.», 1971, 19, 182.
4. Грачев Г. С., Ермилин К. К., Лямов В. Е. «Физика твердого тела», 1976, 18, 304.

Поступила в редакцию
9.7 1976 г.
Кафедра
акустики

УДК 621.372.413;
666.232.27

Х. С. Багдасаров
В. Б. Брагинский
В. П. Митрофанов
В. С. Шиян

ВЫСОКОДОБРОТНЫЙ МЕХАНИЧЕСКИЙ
РЕЗОНАТОР ИЗ МОНОКРИСТАЛЛА
САПФИРА

Один из методов повышения чувствительности детекторов гравитационного излучения состоит в использовании механических резонаторов с высокой добротностью Q [1, 2]. Увеличение Q (увеличение времени релаксации $\tau_{\text{мех}}^* = 2Q/\omega_{\text{мех}}$) позволяет в принципе достоверно обнаруживать слабые кратковременные силовые воздействия ($\tau \ll \tau_{\text{мех}}^*$) на резонатор по изменению амплитуды колебаний Δx , если оно превышает вариации тепловых колебаний $\sqrt{kT/m\omega_{\text{мех}}^2} \sqrt{2\tau/\tau_{\text{мех}}^*}$. Таким образом, увеличение Q (увеличение $\tau_{\text{мех}}^*$) повышает чувствительность гравитационного детектора (см. подробнее [1]).

Ниже кратко изложены результаты измерений Q механического резонатора, изготовленного из синтетического сапфира, а также обсуждены возможные применения таких резонаторов.

Схема установки приведена на рисунке. Резонатор, имеющий длину 15 см и диаметр 4,5 см ($m \sim 10^3$ г), подвешивался на тонкой нити в вакуумной камере ($p = 10^{-7}$ мм рт. ст.), стенки которой могли быть охлаждены жидким азотом и жидким гелием. Непосредственное охлаждение резонатора осуществлялось с помощью обмен-

ного гелия, который затем откачивался. Низкочастотная продольная мода колебаний резонатора ($\omega_{\text{мех}} = 2 \cdot 10^5$ рад/с) возбуждалась кулоновскими силами (торцы резонатора были посеребрены). После того как колебания в резонаторе были возбуждены (обычно до амплитуды $\sim 10^{-7}$ см), генератор возбуждения выключался, и с помощью емкостного пассивного RC-датчика регистрировались свободные затухающие колебания кристалла. По изменению амплитуды колебаний (за время около часа) определялась величина Q . Пассивный датчик мог вносить затухание лишь на уровне $Q \sim 10^{11}$.

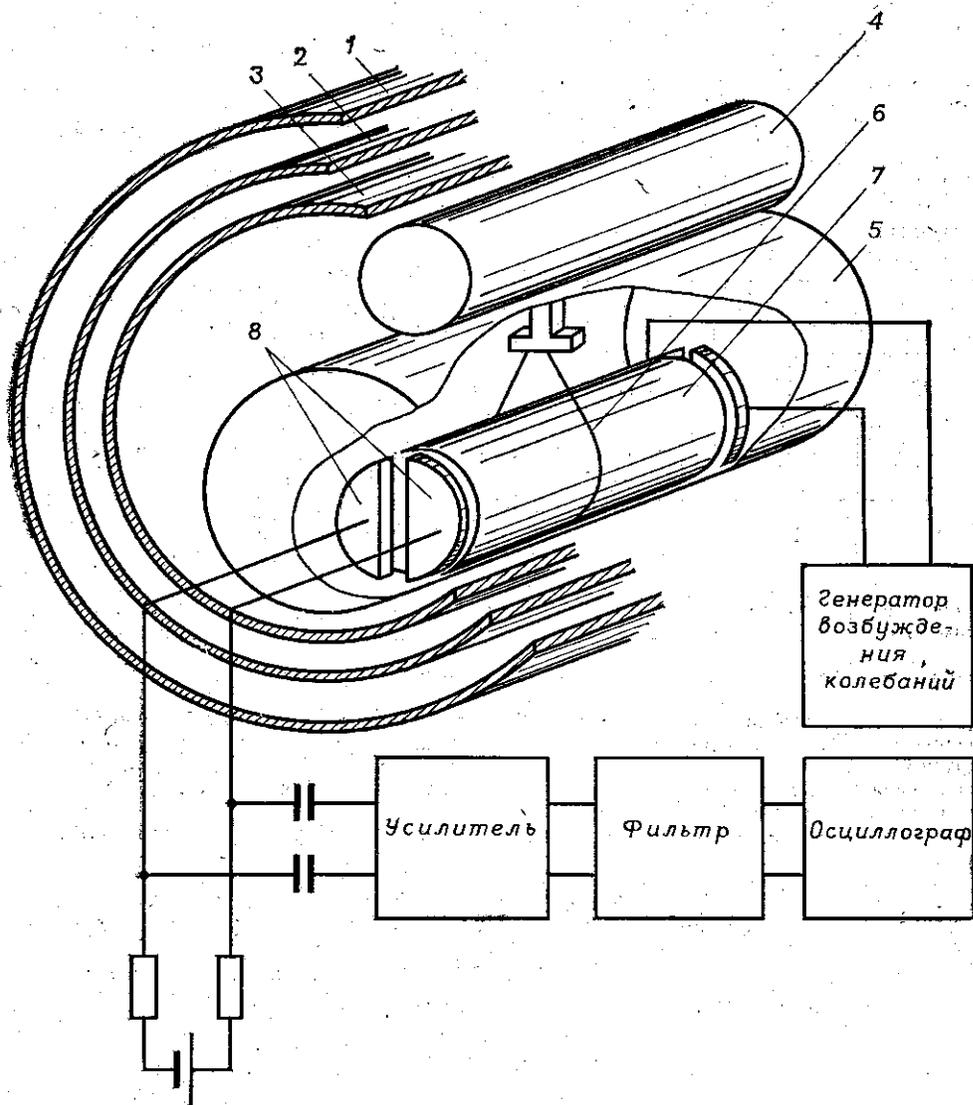


Схема установки для измерения добротности механических резонаторов: 1 — внешняя вакуумная камера, 2 — азотная рубашка, 3 — экран, охлаждаемый парами гелия, 4 — гелиевый дьюар, 5 — внутренняя вакуумная камера, 6 — нить подвеса, 7 — резонатор, 8 — пластины датчика сигнала

Отметим, что для уменьшения потерь в поверхностном слое резонатора его поверхность полировалась алмазными пастами [3], после чего резонатор был подвергнут низкотемпературному отжигу ($t = 1000^\circ\text{C}$, 1 ч).

В таблице представлены измеренные значения Q для двух материалов нитей подвеса. Величина $Q = 5 \cdot 10^9$ соответствует $T_{\text{мех}}^* = 4,6 \cdot 10^4$ с.

Величина Q определяется потерями в подвесе, в поверхности (которые трудно описать аналитически), а также объемными потерями; термоупругим эффектом [4] и взаимодействием упругой волны с тепловыми фононами (эффект Ахизера [5], см.

также [6]). Термоупругие потери дают вклад примерно на два порядка ниже, чем эффект Ахизера:

$$Q^{-1} = \frac{Tc\bar{\gamma}^2}{\rho v^2} \frac{\omega\tau}{1 + \omega^2\tau^2}, \quad (1)$$

где c — удельная теплоемкость, ρ — плотность кристалла, v — скорость упругой волны, τ — время релаксации фононных мод, $\bar{\gamma}$ — величина, связанная с константой Грюнайна, которая характеризует нелинейность модулей упругости. К сожалению, неизвестны точные значения параметров τ и $\bar{\gamma}$ при низких температурах [6] и поэтому можно сделать лишь приближенную оценку величины Q^{-1} .

В таблице приведены для сравнения значения Q , вычисленные по формуле (1) в предположении $\bar{\gamma}=1$ и $\tau=\tau_{\text{теп}}$, определенное по значению коэффициента теплопроводности сапфира. Отметим сразу же, что если знать значения упругих модулей 3-го

Результаты измерения добротности механического резонатора из сапфира ($f = 34$ кГц)

ТК	Теоретические оценки	Подвес на шелке	Подвес на вольфраме
293	$4 \cdot 10^9$	$1,8 \cdot 10^8$	$1,4 \cdot 10^8$
77	$5 \cdot 10^8$	$5,7 \cdot 10^8$	$4,2 \cdot 10^8$
4,3	10^{10}	$5 \cdot 10^9$	$5 \cdot 10^9$

порядка в сапфире при низких температурах, то, пользуясь выражением [1], по измеренному значению добротности можно непосредственно определить величину времени релаксации τ фононов и его температурную зависимость.

Следует указать на некоторые другие возможные применения высокочастотных резонаторов из монокристаллов сапфира. Прежде всего они могут быть использованы как элементы, стабилизирующие частоту электрических генераторов. Учитывая, что сапфир по физико-химической стойкости и добротности значительно превосходит кварц, можно ожидать, что

такие генераторы по стабильности будут превосходить кварцевые. В проведенных нами предварительных измерениях при $T=4,3$ К получено значение стабильности частоты свободных колебаний сапфирового резонатора $\frac{\Delta f}{f} = 2 \cdot 10^{-10}$ за 5 ч.

Параметры резонатора чувствительны к внешнему воздействию. Изучение изменения добротности и собственной частоты колебаний кристалла при контакте его с другим испытуемым телом может служить методом исследования элементарных сил взаимодействия между ними. Идея такого метода была высказана Л. И. Мандельштамом и развита С. Э. Хайкиным с сотрудниками [7]. При полученных нами значениях добротности резонаторов можно детально изучать элементарные процессы трения и контакта твердых тел.

В заключение обратим внимание на тот факт, что при низких температурах, когда время релаксации тепловых фононов не зависит от температуры, затухание пропорционально $T^2 K^4$, а значит можно ожидать существенное увеличение добротности при охлаждении резонатора ниже 4,2 К.

Авторы выражают благодарность Л. А. Шувалову за ценные дискуссии, а также В. К. Апалькову за помощь в создании установки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Брагинский В. Б., Манукин А. Б. Измерение малых сил в физических экспериментах. М., 1974.
2. Braginsky V. B., Gravitational radiation and gravitational collapse, ed. by Dewitt—Morette, 1974, p. 28—34.
3. Смагин А. Г. Пьезоэлектричество кварца и кварцевые резонаторы. М., 1970.
4. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теория упругости. М., 1965.
5. Ахизер А. И. ЖЭТФ, 1938, 9, 1318.
6. Мэзон У. Физическая акустика. М., 1968.
7. Хайкин С. Э., Лисовский Л. П., Саламонович А. Е. ДАН СССР, 1939, 24.

Поступила в редакцию
13.6.1976 г.
Кафедра
физики колебаний