

СПЕКТРАЛЬНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ПОРОГА ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ СВЕРХПРОВОДЯЩЕГО АТТОМЕТРА

К.И. Андроник, В.М. Пудалов

Результаты измерения спектра шумов измерителя малых смещений и амплитуд механических колебаний сравниваются со спектром тепловых флуктуационных колебаний чувствительного элемента. Измерительное устройство на основе сверхпроводящего резонатора – сверхпроводящий аттометр – имеет пороговую чувствительность $6 \cdot 10^{-18}$ м (6 аттометров) при времени усреднения $2,5 \cdot 10^3$ сек, в диапазоне частот колебаний $10^3 \div 3 \cdot 10^4$ Гц.

Экспериментальные методы измерения предельно малых механических смещений и амплитуд колебаний быстро развиваются в связи с созданием приемников гравитационных волн¹⁻⁴, а также в связи с исследованием слабых пьезо-, магнитострикционных эффектов и фазовых переходов в образцах малых размеров при низкой температуре⁵⁻⁷.

Один из наиболее плодотворных методов измерения малых смещений и амплитуд колебаний, восходящий к⁷, основан на использовании коаксиального резонатора с емкостной нагрузкой^{2-4,6,7}, увеличивающей вблизи поверхности колеблющегося объекта, в малом объеме плотность электромагнитной энергии СВЧ. В связи с тем, что пороговая чувствительность таких устройств приближается к ограничениям принципиального характера, представляет интерес выяснение спектра реальных шумов измерительного устройства и сравнение его с теоретическим спектром естественных флуктуаций.

1. Устройство и функционирование сверхпроводящего аттометра. Структурная схема измерительной установки изображена на рис. 1. Сверхпроводящий измерительный резонатор ИР типа⁷ изготовлен из массивного ниобия; его дном служит ниобиевая мембрана М массой $m = 85$ г. Закрепление мембраны по периметру за тонкую проточенную часть, а также бесконтактное соединение ее с резонатором позволили получить добротность $Q_M = 6 \cdot 10^2$ на основной моде механических колебаний ($f_M = 55$ кГц). Сверхпроводящий резонатор размещен в вакуумном объеме криостата, при $T = 4,2$ К. Схема затягивания частоты связывает его с мал шумящим генератором СВЧ на диоде Ганна⁸ и одновременно снижает флуктуации частоты генератора в ~ 200 раз в полосе частот $\sim 0 \div 10^5$ Гц. Собственная частота резонатора $\nu_0 = 9300$ МГц, добротность $Q = 2 \cdot 10^5$, рабочий зазор Δ между центральным стержнем резонатора и мембраной $\Delta \approx 5$ мкм, производная частоты по изменению зазора $d\nu_0 / d\Delta \approx 10^{14}$ Гц/м.

Частотная модуляция сигнала генератора Г, вызванная колебаниями мембраны, преобразуется частотным дискриминатором ЧД (на основе сверхпроводящего резонатора) в амплитудную модуляцию. Амплитудно-модулированный сигнал детектируется мал шумящим диодным детектором, селективно усиливается и синхронно детектируется.

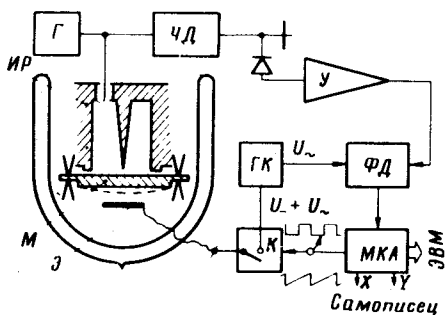


Рис. 1

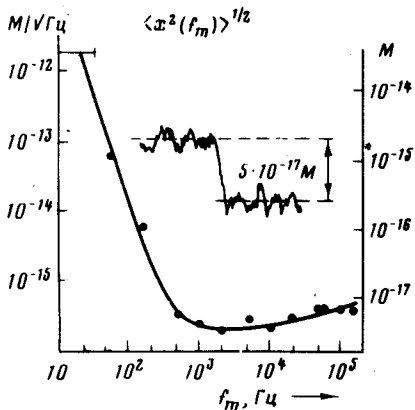


Рис. 2

Рис.1. Структура измерительной установки : Г – генератор СВЧ на диоде Ганна, ИР – измерительный резонатор, М – мембрана, Э – электрод для электростатической калибровки, ЧД – частотный детектор на основе сверхпроводящего цилиндрического резонатора, У – селективный усилитель Unipac-233, ФД – фазовый детектор, ГК – генератор переменного калибровочного напряжения U_{\sim} с регулируемым средним уровнем U_{-} (НР-3310А), К – электронный ключ, МКА – многоканальный анализатор NTA-1024

Рис.2. Зависимость порога чувствительности аттометра от частоты колебаний мембраны. Левая ось ординат – шум в полосе 1 Гц, правая ось – шум после усреднения за время $2,5 \cdot 10^3$ сек. На врезке изображен пример записи вынужденных колебаний мембраны на частоте 15 кГц с амплитудой $5 \cdot 10^{-17}$ м (время усреднения $2,5 \cdot 10^3$ сек)

2. Измерение спектра шумов аттометра. С помощью сил электростатического притяжения $\sim U_{\sim} \cdot U_{-}$ (рис.1), аналогично ^{9,3,4} возбуждались вынужденные колебания мембраны на частоте сигнала U_{\sim} генератора калибровочного напряжения ГК. Выделение сигнала из шума осуществлялось многоканальным анализатором МКА. Ключ в цепи подачи электростатического сигнала замыкается в начале каждого цикла сканирования МКА и размыкается в момент прохождения половины каналов. В результате N -кратного когерентного суммирования отношение сигнал/шум улучшается $\sim \sqrt{N}$. Накопленный сигнал передается в мини-ЭВМ EMG-666 для статистической обработки.

На врезке рис.2 изображен пример измерения колебаний с амплитудой $5 \cdot 10^{-17}$ м, возбуждаемых на частоте 15 кГц. Результат измерений выведен на самописец из МКА после $5 \cdot 10^4$ накоплений (в течение $2,5 \cdot 10^3$ сек). Дисперсия, т.е. пороговая чувствительность для этого примера составляет $6 \cdot 10^{-18}$ м, что соответствует $3 \cdot 10^{-16}$ м/√Гц.

Зависимость пороговой чувствительности устройства от частоты колебаний мембраны приведена на рис.2. Одна из осей ординат соответствует полосе частот 1 Гц, другая – минимально реализованной полосе (время накопления $2,5 \cdot 10^3$ сек). Скобкой на рис.2 в интервале частот $0 \div 40$ Гц отмечен результат, полученный путем подачи на электростатическую систему только постоянного напряжения на время прохождения половины каналов (25 мсек).

Пороговая чувствительность в области $10^3 \div 10^5$ Гц определяется частотным шумом генератора и шумом диода. Ниже частоты 10^3 Гц кроме этих факторов сказывается влияние вибрационных шумов установки, размещенной в неблагоприятных микросейсмических условиях.

3. Принципиальные ограничения порога чувствительности. Выясним ограничения классического и квантового характера на порог чувствительности измерителя малых смещений.

а) Тепловые флуктуационные колебания мембраны имеют спектр

$$\langle x^2(\omega) \rangle = \frac{2kT}{\pi Q_M \gamma \omega_M \left\{ \left[\left(\frac{\omega}{\omega_M} \right)^2 - 1 \right]^2 + \left(\frac{\omega}{\omega_M} \frac{Q_M}{\omega_M} \right)^2 \right\}} \quad (1)$$

с острым максимумом на частоте механического резонанса ω_M . При измерении вблизи ω_M в полосе 1 Гц:

$$\langle x^2(\omega) \rangle^{1/2} \cong \sqrt{\frac{2kT}{\pi \gamma} \frac{Q_M}{\omega_M}} \sim 4 \cdot 10^{-18} \text{ м} / \sqrt{\text{Гц}}, \quad (2)$$

а на частотах $\omega \ll \omega_M$

$$\langle x^2(\omega) \rangle^{1/2} \cong \sqrt{\frac{2kT}{\pi \gamma Q_M \omega_M}} \sim 2 \cdot 10^{-22} \text{ м} / \sqrt{\text{Гц}} \quad (3)$$

для параметров мембраны, указанных выше. Здесь $\gamma \cong 6 \cdot 10^{11}$ дин/см – жесткость мембраны, зажатой по краям ¹⁰, $T = 4,2$ К.

б) Квантовомеханическая неопределенность прогиба мембраны ¹¹ в полосе 1 Гц:

$$\langle x^2(\omega_M) \rangle^{1/2} \sim \frac{1}{\omega_M} \sqrt{\frac{\hbar Q_M}{2m}} \sim 10^{-20} \text{ м} / \sqrt{\text{Гц}} \quad (4)$$

находится пока за пределами шумов известных измерительных установок¹⁻⁷. В то же время максимум резонансного пика тепловых колебаний (2) всего в ~ 75 раз ниже уровня шумов (рис.2).

В заключение отметим, что описанный аттометр регистрирует колебания в широком диапазоне частот $0 \div 10^5$ Гц. С этой целью в нем использован низкодобротный частотный дискриминатор с шириной полосы $\sim 10^5$ Гц. При измерении в более узком диапазоне частот колебаний целесообразно использовать дискриминатор с большей добротностью. Применительно к данному устройству это позволит снизить порог чувствительности на два порядка, до 10^{-18} м/√Гц в диапазоне частот колебаний $\sim 10^3$ Гц.

Авторы благодарны М.С.Хайкину, И.Я.Краснополю, С.Г.Семенчинскому – за многочисленные обсуждения, А.К.Янышу – за техническую помощь.

Литература

1. Багаев С.Н., Дычков А.С., Чеботаев В.П. Письма в ЖЭТФ, 1981, 33, 85.
2. Oelfke W.E., Hamilton W.O., Darling D. IEEE Trans. on Magnetics 1981, MAG-17, 853.
3. Брагинский В.Б., Панов В.И., Петников В.Г., Попельнюк В.Д. ПТЭ, 1977, №1, 234.
4. Брагинский В.Б., Панов В.И., Попельнюк В.Д. Письма в ЖЭТФ, 1981, 33, 423.
5. Шмальгаузен В.И. УФН. 1980, 132, 679.
6. Van Degrijs C.T. Review of Sci. Instr., 1974, 45, 1171.
7. Pudalov V.M., Khaikin M.S. Cryogenics, 1969, No 4, 128.
8. Анороник К.И., Пудалов В.М. ПТЭ, 1982, №1, 152.
9. Pudalov V.M., Semenchinsky S.G. J. de Physique, 1978, 39, C6-1199.
10. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теория упругости, М.: Наука, 1965.
11. Caves C.M., Thorn K.S., Drever R.W.P., Sandberg V.D., Zimmermann M. Reviews of Mod. Phys., 1980, 52, 341.