

УДК 006.91

Курбаський В.П.¹, Погосов В.В.², Коротун А.В.¹, Малиш Р.О.³

¹канд. фіз.-мат. наук, доц. ЗНТУ

²д-р фіз.-мат. наук, проф. ЗНТУ

³студ. гр. РТ-318сп ЗНТУ

РОЗРАХУНОК ШУМОВИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИЛАДІВ НАНОМЕТРОЛОГІЇ

Особливістю наномасштабних вимірювань є велика, іноді визначальна, роль фізичних флуктуацій [1]. Як результат, часто спостерігається низьке відношення сигналу до шуму, висока чутливість до наводок, вібрацій і дрейфів різного походження. Мета даної роботи – розгляд джерел шуму і розрахунок шумових характеристик трьох пристроїв, які широко використовуються у нанометрології, – просвічуючого електронного мікроскопа (ПЕМ), скануючого тунельного мікроскопа (СТМ) та СКВІДа (Superconducting Quantum Interference Device).

Розрізняють два види шуму – дробовий та тепловий, які мають принципово різну природу [2]. Флуктуації струму, пов'язані з випадковим характером емісії носіїв або їх проходження крізь потенціальний бар'єр, називають дробовим шумом. Флуктуації струму, обумовлені хаотичним тепловим рухом носіїв, називають тепловим шумом.

Розглянемо результати розрахунку дробового шуму у ПЕМ і СТМ. У ПЕМ його джерелом є флуктуації емісії електронів з катоду, у СТМ дробовий шум обумовлений випадковим характером долання електронами потенціального бар'єру між вістрям зонду і поверхнею зразка. В обох випадках він визначається величиною середнього струму $\bar{I}$ і шириною смуги частот $\Delta\nu$ приладу. Середній квадрат флуктуацій струму

$$\overline{\delta I^2} = 2e\bar{I}\Delta\nu, \quad (1)$$

де e – заряд електрона.

Люмінесцентний екран ПЕМ усереднює флуктуації струму за проміжок часу, який за порядком величини дорівнює тривалості післясвітіння люмінофору τ , в результаті чого залишаються флуктуації з найнижчими частотами в інтервалі шириною

$$\Delta\nu \approx 1/\tau. \quad (2)$$

Для типових значень $\bar{I} = 1$ нА, $\tau = 1$ с середня амплітуда дробового шуму $\sqrt{\overline{\delta I^2}} \cong 10^{-14}$ А. Ширину смуги частот СТМ можна оцінити за тою ж

самою формулою (2), тільки під τ слід розуміти сталу часу паралельного RC - ланцюжка, який моделює вхід вимірювального пристрою, так що $\tau = RC$. Приймаючи $\bar{I} \cong 10$ нА, $C \cong 1$ мкФ, $R \cong 1$ Ом, отримуємо для середньої амплітуди дробового шуму значення $\sqrt{\delta I^2} \cong 10^{-11}$ А.

Перейдемо до результатів розрахунку теплового шуму у СТМ. Як і у попередньому випадку, вхід вимірювального пристрою, приєднаного до СТМ, моделюється $R_f C_f$ - ланцюжком. Для обчислень теплового шуму у навантаженні R_f використано схему, в якій генератор флуктуацій струму приєднаний до кола, що складається з послідовно з'єднаних опору R_f і паралельного RC_f - ланцюжка (R - опір зонду). Для середньої амплітуди теплового шуму отримано вираз:

$$\sqrt{\delta I^2} = \sqrt{\frac{kT}{RR_f C_f}}, \quad (3)$$

де T – температура пристрою, k – стала Больцмана. Для оцінки підставляємо у формулу (3) чисельні значення $C_f = 1$ мкФ, $R_f = 1$ Ом, $R = 10$ МОм. В результаті маємо $\sqrt{\delta I^2} = 2 \cdot 10^{-11}$ А.

СКВІД уявляє собою надпровідне кільце, в яке включено два джозефсонівські контакти. Гранична чутливість СКВІДа визначається величиною магнітного потоку $\delta\Phi_{\min}$ через кільце, що викликає на виході вимірювальної схеми сигнал, рівний середньоквадратичній величині (середній амплітуді) шуму. Найбільший внесок дають теплові флуктуації в області контактів і в резонансному контурі вимірювальної схеми.

Розрахунок показав, що

$$\delta\Phi_{\min} = L\sqrt{4kT\Delta\nu/R}, \quad (4)$$

де L – індуктивність кільця СКВІДа, R – опір контактів, $\Delta\nu$ – смуга частот. Для оцінки граничної чутливості СКВІДа були використані типові значення $L = 10^{-10}$ Гн, $R = 5$ Ом, $T = 4$ К. В результаті було отримано $\delta\Phi_{\min}/\delta\nu^{1/2} = 7 \cdot 10^{-22}$ Вб/Гц^{-1/2}. Ця величина на кілька порядків менша за досягнуту у реальних пристроях, оскільки існує низка інших механізмів, які дають внесок у власний шум пристрою.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. **Коротун, А. В.** Вступ до нанометрології [Текст] / А. В. Коротун, В. М. Коржик, В. М. Рубіш та ін.; за ред. Ю. А. Куницького. – Київ: ІПРІ НАНУ, 2017. – 306 с.

2. **Букингем, М.** Шумы в электронных приборах и системах [Текст] / М. Букингем. – М.: Мир, 1986. - 399 с.