

広帯域低雑音の SICM 計測のための電流アンプの設計と ナノピペット容量性ノイズの検討

Consideration of a design of a current amplifier and the reduction of a capacitive noise
from the nanopipette probe for high-bandwidth and low-noise SICM measurements

金沢大院・ナノ生命¹, 金沢大・WPI-NanoLSI²

○(M1) 亀井 翔天¹, 渡邊 信嗣²

Grad. Sch. NanoLS., Kanazawa Univ.¹, WPI-NanoLSI, Kanazawa Univ.²,

Shoma Kamei¹, Shinji Watanabe²

E-mail: snake20010218@stu.kanazawa-u.ac.jp

走査型イオン伝導顕微鏡 (SICM) はナノピペット先端開口を通過する微小イオン電流変化を検出することで液中にある試料表面形状をナノ解像度で計測可能なプローブ顕微鏡である。微小電流検出の性能がイメージの質を左右する重要な要素となっており、本研究では広帯域かつ低雑音な SICM 計測を実現するための電流検出系の設計および探針であるナノピペットに起因するノイズの減少を以下のように検討した。

SICM 計測の電流ノイズ解析では、電流検出器とナノピペットがカップルする等価回路を用いる (Fig. 1a)。トランスインピーダンスによりナノピペットを通過する電流信号 I_{in} を検出する状況を考えて、出力のノイズ密度 S_n は $S_n(\omega) \approx 4k_B T / (R_S || R_F) + (\omega C_T e_n)^2$ と近似される [1]。第 1 項がナノピペット抵抗 R_S とフィードバック抵抗 R_F からなる熱ノイズで、第 2 項は周波数 ω 依存するため 10 kHz 以上の領域で出力ノイズの主要因となる。この項はオペアンプの入力電圧換算ノイズ e_n および総入力容量 $C_T \sim C_{in} + C_S$ を減少することで抑えられるが、オペアンプに依存する e_n と C_{in} がともに極めて小さいオペアンプはない。このため、要求する周波数範囲で出力ノイズを抑えるには、ナノピペット容量 C_S の値を考慮した電流検出系の設計が肝要になる。Figure 1b に、電流検出系の設計によって出力ノイズ (帯域 100 kHz あたりの二乗平均平方根 (RMS) で示す) が C_S に対してどのように変化するかを示す。市販の電流アンプ CA-656F2 (NF Corp.) [2] と自作の電流アンプとの比較を行ったところ、 $C_S \leq 20$ pF の範囲で自作アンプの出力ノイズは同じトランスインピーダンス 1G Ω を有する市販アンプよりも優れていた。これは、自作アンプが市販アンプに比べて e_n が大きい一方で C_{in} を抑えてある設計のためであり、適切な電流計測系の設計により SICM 計測における雑音が低下できることを示している。SICM 計測で $C_S \sim 8$ pF 程度が典型的な値であるが、Fig. 1b に示すように、 C_S を更に低下することで雑音性能は更に改善される。ナノピペットをエラストマーで被覆することで C_S を低下する手法が最近提案されているが [3]、この手法はかなり煩わしい処理を要するため、実用性に難がある。講演では、 C_S を低下する簡易処理の検討、およびこの処理によるナノピペットを用いて雑音性能が向上した SICM イメージングの結果も示す予定である。

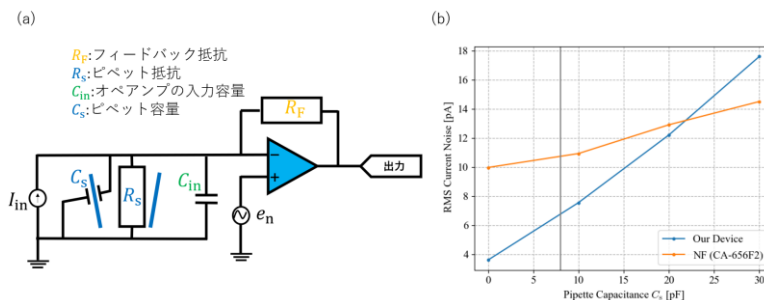


Figure 1:(a) Equivalent circuit of SICM current detection system.
(b) Comparison of C_S dependence of RMS current noise in 100 kHz bandwidth in our device and commercially available amplifier.

参考文献

- [1] J. K. Rosenstein, et al., Nat. Methods, 9, 487 (2012).
- [2] 微小電流計測で用いられる Axopatch 200B (Molecular Device) と同等のノイズ性能
- [3] C. Lei, et al. IEEE Trans. Ind. Electron., 1 (2023).