

周波数変調型静電引力顕微鏡における静電容量の定量測定に向けた金属-半導体間の静電引力と周波数シフト量の関係の定式化

Formulation between electrostatic force and frequency shift in

FM-EFM for quantitative capacitance measurements

○(DC) 福澤 亮太¹, 高橋 琢二^{1,2} (1. 東大生研, 2. 東大ナノ量子機構)

(DC) Ryota Fukuzawa¹ and Takuji Takahashi^{1,2}

(1. IIS & 2. NanoQuine, The University of Tokyo)

E-mail:fkryota@iis.u-tokyo.ac.jp



金属-半導体間の静電容量には、外部電圧によってその値が変化する空乏層容量が含まれるため、電荷 Q_t と電圧 V の間には金属-金属間のような単純な比例関係はない。そのため、両者間に働く静電引力を計算する際にもこの点を考慮しなければならない。S. Hudret らは、金属-半導体間に作用する静電引力 F^{ele} は誘導された電荷 $Q_t(V, z)$ を用いて (1) 式のように書けることを導いた [1]。ここで、 ϵ_0 と S はそれぞれ真空の誘電率および平行平板電極の面積である。一方、小振幅動作状態での周波数変調型静電引力顕微鏡 (FM-EFM) では、観測される周波数シフト Δf は力勾配 $\partial F^{\text{ele}}/\partial z$ (z : 探針-試料間距離) に比例するため、周波数シフトに関する定式化が必要である。また、静電容量 C の定量的測定のためには、 dC/dz ではなく C が陽に現れるようにすることも大事である。そこで我々は、周波数依存性を考慮しながら静電引力と周波数シフト量の関係式を導いた上で、実験的にその妥当性を検証した。

まず我々は、 $\partial Q_t(V, z)/\partial z$ を計算することで、探針が角振動数 ω_0 で振動している時の周波数シフトを (2) 式のように表せることを導いた。ここで、 $C(\omega_0)$ は角周波数 ω_0 における探針-試料間の合成静電容量、 k はカンチレバーのばね定数である。また、 $C(\omega_0)$ や周波数シフト Δf には、 z の変動に対する表面・界面準位への電荷充放電の追従性が周波数によって異なるために、探針振動周波数依存性が現れる。次に、二重変調交流電圧 $V_1 \sin \omega_1 t, V_2 \sin \omega_2 t$ および直流バイアス V_{DC} を印加した際の周波数シフトの交流成分について考える。電荷の変動を (3) 式のように線形近似し、(2) 式に代入することで交流成分が求まる。 $\omega_1, \omega_2 \approx \omega_0$ の時、角周波数 $\omega_d (\equiv \omega_2 - \omega_1)$ 成分は (4) 式で表せることが導かれる。従って、 Δf_{ω_d} の測定値を元にして、(4) 式から静電容量 $C(\omega_0)$ を定量的に見積もることが可能になる。Figure 1 に、 n 型 Si 基板上で行った Δf_{ω_d} 測定の結果から (4) 式を使って換算して得られた C - V 特性を示す。これは典型的な n 型半導体の C - V 特性に対応しており、また、得られた値も探針-試料間の静電容量として典型的な aF というオーダーであることから、(4) 式の妥当性が示された。なお、パラメータ S は蓄積条件に相当する直流電圧 (n 型半導体に対しては負の試料電圧) を印加した状態で得た F - z 曲線に $Q = \epsilon S V/z$ の関係式を使ってフィッティングすることで見積もっている。

被測定試料は重川研究室 (大阪市大) より提供していただいた。

[1] S. Hudret, et al, *Journal of Applied Physics*, **77**, 3308 (1995).

$$F^{\text{ele}} = -\frac{Q_t^2(V, z)}{2\epsilon_0 S} \quad (1)$$

$$\Delta f = -\frac{\omega_0}{2k} C(\omega_0) \frac{Q_t^2(V, z_0)}{\epsilon_0^2 S^2} \quad (2)$$

$$Q_t \approx Q(V_{\text{DC}}) + \sum_{i=1}^2 C(\omega_i) V_i \sin \omega_i t \quad (3)$$

$$\Delta f_{\omega_d} \approx \frac{\omega_0 V_1 V_2}{2k\epsilon_0^2 S^2} C^3(\omega_0) \quad (4)$$

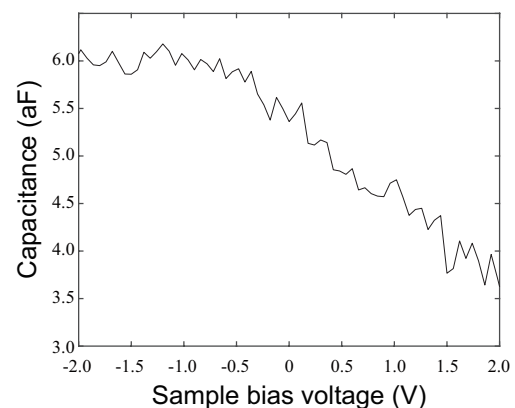


Fig.1 Capacitance-voltage characteristic on a n -type Si substrate calculated from Δf_{ω_d} using Eq.(4)