

ジュール熱の外部変調を利用した非接触型抵抗原子間力顕微鏡法 Noncontact resistance force microscopy using external modulation of joule heating

○(DC) 福澤 亮太¹, 梁 剣波³, 重川 直輝³, 高橋 琢二^{1,2}

(1. 東大生研, 2. 東大ナノ量子機構, 3. 大阪市大工,)

(DC)○Ryota Fukuzawa¹, Jianbo Liang², Naoteru Shigekawa², and Takuji Takahashi^{1,3}

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

3. Grad. School of Eng., Osaka City University)

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



周波数変調型原子間力顕微鏡 (FM-AFM) では、探針-試料間に作用する保存力と散逸力とを切り分けて測定することができる。新井らは、ジュール熱が抵抗値に比例するという近似の下で金属-金属間に作用する静電引力の表式を用い、また、カンチレバー振動の周波数シフトやエネルギー散逸量の距離依存性などを分光的に計測することによって、試料の局所抵抗を算出する手法を提案している [1]。ここで、ジュール熱の抵抗値に対する非線形性や半導体の空乏層の影響を加味した静電引力を考慮することによって、より厳密に抵抗値を同定できる可能性がある。また、画像化の観点では、測定時間とデータ量の短縮のためにも分光的な測定法を用いない方法が好ましい。本発表では、ジュール熱の抵抗値依存性をシミュレーションした結果、ならびに、外部印加電圧を変調することで分光測定を必要とせずに抵抗値を画像化できる手法 (非接触型抵抗原子間力顕微鏡法: nc-RFM) について報告する。

Figure (a) に、振動する極板間に発生するジュール熱をシミュレーションした結果を示す。ここでは、極板間静電容量 C を 5 aF、振動周期 T を 1 μsec としている。この図から、 RC 時定数が T よりも十分短い領域、すなわち、抵抗が 10 G Ω 程度よりも低い領域ではジュール熱 D^J は抵抗値 R に比例するが、 RC 時定数が長くなると、ジュール熱は減少していくことがわかる。これは、 R が小さい領域では抵抗値の変化に対する変位電流の変化は小さく、定電流源と抵抗によるジュール熱発生とみなせるのに対し、 RC 時定数が長くなると電荷の充放電が極板振動に追従しなくなってジュール熱発生量が減少してくものと解釈できる。低抵抗領域 (線形領域) では抵抗での電圧降下は印加電圧に対して十分小さいと考え、また、我々が導出した金属-半導体間での静電引力と周波数シフト Δf の関係式を用いると、 D^J と Δf との関係式 (1) が導かれる。Fig. (a) の実線は (1) 式をプロットしたものであり、シミュレーションとよく一致していることがわかる。さらに、二重変調交流電圧 $V_1 \sin \omega_1 t, V_2 \sin \omega_2 t$ ($\omega_1, \omega_2 \approx \omega_0$: 共振角周波数) を印加した際の散逸量および周波数シフトの角周波数 ω_d ($\equiv \omega_2 - \omega_1$) 成分 $D_{\omega_d}^J, \Delta f_{\omega_d}$ を画像化したデータから抵抗像を再構成できることもわかった。直接貼り合わせ p -Si/ n -Si の切断面上で得られた形状像、抵抗像をそれぞれ Fig. (b), (c) に示す。ドーピング密度の異なる n 型と p 型領域とでは、抵抗値も異なっていることが示された。なお、 p 型領域内の接合面近傍での抵抗値の上昇は、界面のアモルファス化が関係していると考えている。

$$D^J = -2\pi k A^2 R C (\omega_0) \Delta f \quad (k: \text{ばね定数}, A: \text{振幅}). \quad (1)$$

[1] T. Arai, et al, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **57**, 08NB04 (2018).

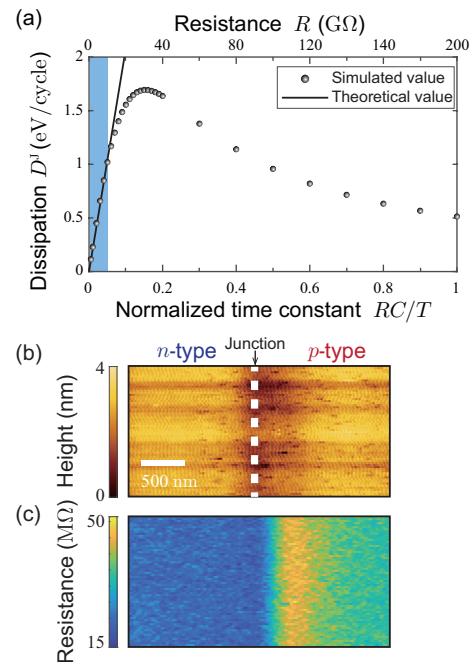


Fig.1 (a) Simulated energy dissipation induced by joule heating. (b) Topographic and (c) resistance images across directly bonded Si p - n junction.