

# 周波数変調型静電引力顕微鏡法によるキャリア密度の定量測定

## Quantitative carrier density measurements in FM-EFM

○ 福澤 亮太<sup>1</sup>, 梁 劍波<sup>3</sup>, 重川 直輝<sup>3</sup>, 高橋 琢二<sup>1,2</sup>

(1. 東大生研, 2. 東大ナノ量子機構, 3. 大阪市大工, )

○ Ryota Fukuzawa<sup>1</sup>, Jianbo Liang<sup>2</sup>, Naoteru Shigekawa<sup>2</sup>, and Takuji Takahashi<sup>1,3</sup>

(1. IIS & 2. NanoQuine, The University of Tokyo, 3. Grad. School of Eng., Osaka City University)

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

周波数変調型静電引力顕微鏡法 (FM-EFM) では、探針-試料間に作用する静電引力をカンチレバーの共振周波数シフトとして捉えることができ、静電容量や表面ポテンシャルなどを高い空間分解能で定性的に評価することができる。一方で、特に半導体試料上での測定において、探針形状の複雑さや表面空乏層の影響などにより、観測された周波数シフトの値を静電容量の値に定量換算することは困難であった。我々はこれまでの研究で、FM-EFMによる静電容量の定量測定法を提案しているが[1]、得られた静電容量の値の妥当性に関して十分な検討がされていなかった。そこで今回我々は、提案した手法を用いた  $C-V$  測定からキャリア密度の同定を行い、値の妥当性の検証を行った。

今回は被測定試料として  $p$  型および  $n$  型 Si を用いた。我々の定式化では、探針-試料間に交流電圧  $V_1 \sin \omega t + V_2 \sin(\omega + \omega_d)t$  ( $\omega_d \ll \omega$ ) を印加した際のある  $\omega$  に対する周波数シフト量の角周波数  $\omega_d$  成分、 $\Delta f_{\omega_d}^{\text{ele}}(\omega)$ 、および  $\omega = \omega_0$  の時の  $\Delta f_{\omega_d}^{\text{ele}}(\omega_0)$  の値から、(1) 式によって角周波数  $\omega$  における静電容量の値へと換算可能である。ここで、 $\omega_0$ ,  $k$ ,  $S$ ,  $\epsilon_0$  はそれぞれカンチレバーの共振周波数、ばね定数、探針-試料キャパシタを平行平板キャパシタで置き換えた時の等価面積、真空の誘電率である。ここでの  $k$  および  $\omega$  の値は、それぞれおおよそ 40 N/m および 270 kHz であった。Fig.1 に提案手法を用いて  $p$  型 Si 基板上で取得された  $C-V$  特性を示す。なお、交流電圧に対し表面準位が応答しないよう  $\omega/2\pi = 1$  MHz とし、また  $\omega_0/2\pi \approx 300$  kHz とし、 $\Delta f_{\omega_d}^{\text{ele}}(\omega_0)$  を測定した。また、パラメータ  $S$  は蓄積条件に相当する直流電圧を印加した状態で得た静電引力による周波数シフト vs 距離曲線に  $Q = \epsilon SV/z$  の関係式を使ってフィッティングすることで見積もった。得られた  $C-V$  特性の最大値 ( $\text{SiO}_2$  および空隙部分の容量に相当) と最小値 (最大空乏条件に相当) から最大空乏層幅を推定することで見積もったキャリア密度の値と、ホール効果測定で見積もったキャリア密度の値を比較したところ、Table 1 に示すようにおおよそ一致した。

以上の結果から、我々が提案した静電容量の定量測定法の妥当性を確認できた。本手法を Hign&Low 法などに応用することで、表面準位の状態密度の定量評価などが期待される。

[1] 福澤亮太, 高橋琢二, 第 82 回 応用物理学会 秋季学術講演会, 11a-N301-4, (2021).

$$C(\omega) = \left( \frac{4\pi k \epsilon_0^2 S^2}{\omega_0 V_1 V_2} \right)^{1/3} \left[ \frac{\Delta f_{\omega_d}^{\text{ele}}(\omega)}{(\Delta f_{\omega_d}^{\text{ele}}(\omega_0))^{1/3}} \right]^{1/2} \quad (1)$$

Type	Carrier density ( $\text{cm}^{-3}$ )	
	FM-EFM	Hall Meas.
$n$	$3.0 \times 10^{16}$	$6.6 \times 10^{16}$
$p$	$2.1 \times 10^{17}$	$2.7 \times 10^{17}$

Table 1 Estimated carrier densities by FM-EFM & Hall effect measurement.

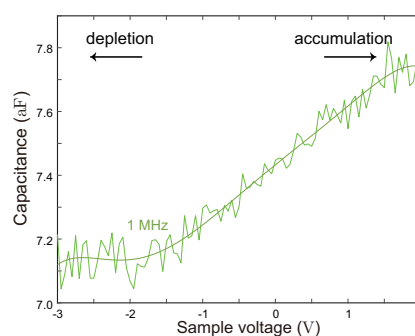


Fig.1 Capacitance-voltage characteristic on a  $p$ -type Si substrate.