

有限要素法による不純物濃度の異なる半導体の表面電位解析

A Study on Analysis of Surface Potential on Doped Semiconductors with Finite Element Method

○宮野晴行¹, 佐藤大知², 東尾順平³, 高橋芳浩⁴, 芦澤好人⁴, 塚本新⁴, 上原利夫³, 中川活二⁴
 *Haruyuki Miyano¹, Daichi Satou², Jumpei Higashio³, Yoshihiro Takahashi⁴
 Yoshito Ashizawa⁴, Arata Tsukamoto⁴, Toshio Uehara³, Katsuji Nakagawa⁴

We have investigated an evaluation method of impurity density in semiconductor by an Electrostatic Force Microscope (EFM). We simulated surface voltage on doped semiconductors to analyze the impurity density in the semiconductor by a Finite Element Method using one-dimensional model. Simulated surface voltage originated from difference in work function between metal sensor and semiconductor sample agreed with voltage on a Si surface measured by an EFM.

1. 研究背景

半導体工学において、半導体にドーピングする不純物は、その種類や濃度でデバイスの性能を左右する重大な要素である。そのため、不純物の種類や濃度を精度よく評価することは、半導体デバイスの製造において、デバイスの信頼性と生産性を向上させるために重要である。現在、静電気力顕微鏡 Electrostatic Force Microscope (EFM) により測定した半導体の表面電位から、半導体の不純物濃度を評価する方法が提案されており、その測定結果が報告されている^[1]。そこで、不純物濃度の異なる半導体試料の表面電位のシミュレーションを行い、EFM による半導体不純物濃度の測定に対する評価を行った。

2. EFM による半導体表面電位の測定原理

EFM を用いた半導体の表面電位測定の原理をエネルギーバンド図を用いて考える。測定モデルのイメージ図を Figure 1 に示す。Figure 1 は、空気中において半導体試料に金属センサーを接近させた様子を示しており、センサー先端部において、センサー (Au)、空気 (Air)、半導体 (Si) の三層構造としてみなせる。この三層構造をエネルギーバンド図として表したのが Figure 2 である。Figure 2 (a) は P 形半導体試料に金属センサーを接近させ、半導体表面にキャリアが誘起された状態、Figure 2 (b) はセンサーに直流バイアス V_{DC} を印加し、半導体側のバンドがフラットバンドになった状態のエネルギーバンド図をそれぞれ示している。Figure 2 中の $q\phi_m$ は金属の仕事関数、 $q\phi_s$ は半導体の仕事関数、 $q\chi$ は電子親和力、 qE_g は禁制帯幅、 E_c は導電帯下端の準位、 E_v は価電子帯上端の準位、 E_f はフェルミ準位、そして E_i は真性フェルミ準位を示している。

半導体にセンサーを接近し半導体表面にキャリアが誘起すると、それに応じて半導体表面のバンドが $q(\phi_m - \phi_s)$ だけ曲がる(Figure 2 (a))。このとき、金属センサーと半導体試料表面の電位差が 0 V になるようセンサーに直流バイアス V_{DC} を印加する。これにより、半導体表面のキャリア数が 0 となり、半導体表面のバンドがフラットバンドになる(Figure 2 (b))。このとき EFM においては、センサーに印加した直流バイアス V_{DC} を表面電位として測定する。バンドの曲がり分の電位差は、金属センサーの仕事関数 $q\phi_m$ と半導体試料の仕事関数 $q\phi_s$ の差における電位差 $(\phi_m - \phi_s)$ に相当するため、直流バイアスの値は $V_{DC} = \phi_m - \phi_s$ となり、これが表面電位として測定できる。このとき、 $q\phi_s$ は半導体の不純物濃度に依存するため、EFM で測定した半導体表面電位から不純物濃度を評価できる。

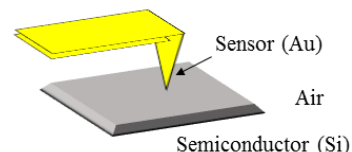
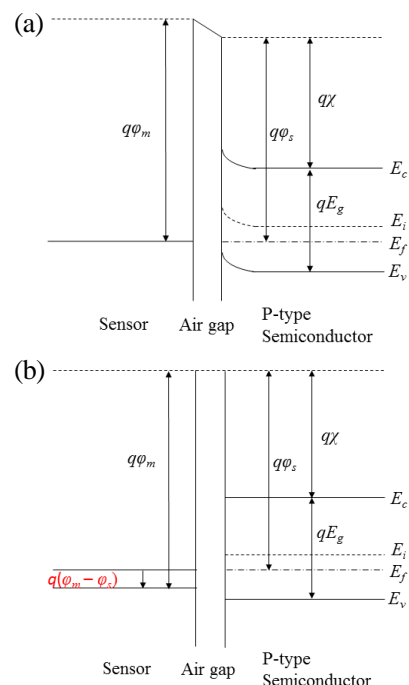


Figure 1 The image on measurement model

Figure 2 Band condition for P-type semiconductor electrically connected with (a) the sensor and (b) the biased sensor by $q(\phi_m - \phi_s)$

3. シミュレーション方法

シミュレーションソフト COMSOL Multiphysics を用い、有限要素法によってセンサーおよび半導体表面の電位を解析した。シミュレーションモデルを Figure 3 に示す。Figure 3 は、前述したセンサー、空気、半導体の三層構造を 1 次元化したモデルである。センサーには金の仕事関数 4.9 V を与えた。半導体試料には Table 1 に示したシリコンの各パラメータ^[2]と、4 種の不純物の設定を行った。設定温度は 293.15 K である。シリコンと空気層の境界点を半導体表面とし、その点の電位を解析した。

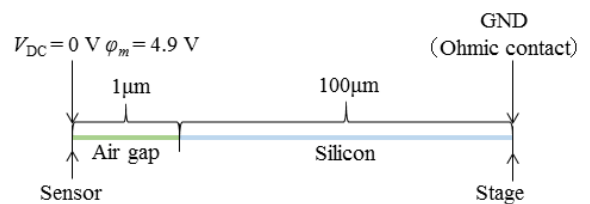


Figure 3 The one-dimensional simulation model of a sensor of EFM on semiconductor sample with air gap as a metal-insulator-semiconductor structure

4. シミュレーションにおける表面電位の決定方法

半導体試料の表面電位を求める方法として、1) 金属センサーと半導体試料表面の電位差 ($\phi_m - \phi_s$) を直接算出する方法。2) 金属センサーと半導体試料表面の電位差が 0 V となるように、センサーに直流バイアス V_{DC} を印加したときの V_{DC} を参照する方法の二つの方法を検討した。この二つの比較を Table 2 に示す。Table 2 より、いずれの不純物濃度においても、 $\phi_m - \phi_s$ と V_{DC} の値よく一致している。このことから、EFM における直流バイアス V_{DC} の計測が $\phi_m - \phi_s$ を評価していることがシミュレーションにおいても確認された。

Table 1 Simulation parameters of silicon and impurities

Energy gap E_g	1.12 V
Electron affinity χ	4.05 V
Effective density of states on conduction band N_c	$1.0 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$
Effective density of states on valence band N_v	$2.9 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$
N-type Impurity concentration n_d	$2.0 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$
	$4.0 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$
P-type Impurity concentration n_a	$3.0 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$
	$1.0 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$

5. 種々の不純物濃度の半導体の表面電位の解析

Figure 4 に P 形および N 形半導体の V_{DC} の解析結果を、EFM での測定結果^[1] および、 $\phi_m - \phi_s$ の理論値とともに示す。Figure 4 より、解析結果と $\phi_m - \phi_s$ の理論値を比較すると、その差は最大でも 0.07 V 程度と、非常に近い値となっており、かつ、不純物濃度の上昇に伴って表面電位の絶対値が上昇するという傾向もよく一致している。この結果から、EFM を用いた半導体の表面電位の測定原理が妥当なものであることを示した。

Table 2 Computed surface voltage by different method

Impurity concentration [cm^{-3}]	$\phi_m - \phi_s$ [V]	V_{DC} [V]
1.0×10^{16}	-0.095	-0.095
3.0×10^{19}	-0.322	-0.323

6. まとめ

不純物濃度の異なる半導体試料(Si)の表面電位を、COMSOL Multiphysics を用いて有限要素法により解析した。 $V_{DC} = 0 \text{ V}$ の時の金属センサーと半導体試料表面の電位差 $\phi_m - \phi_s$ と、金属センサーと半導体試料表面の電位差が 0 V となるような V_{DC} の値とを比較したところ、よく一致した。このことから直流バイアス V_{DC} を計測することが、 $\phi_m - \phi_s$ を評価していることがシミュレーション結果からわかった。不純物濃度の異なるいくつかの半導体表面電位のシミュレーション結果と、 $\phi_m - \phi_s$ の理論値を比較すると、その値と傾向ともに非常に近いものが得られた。この結果から、EFM による半導体の表面電位の測定原理は妥当なものであると示した。

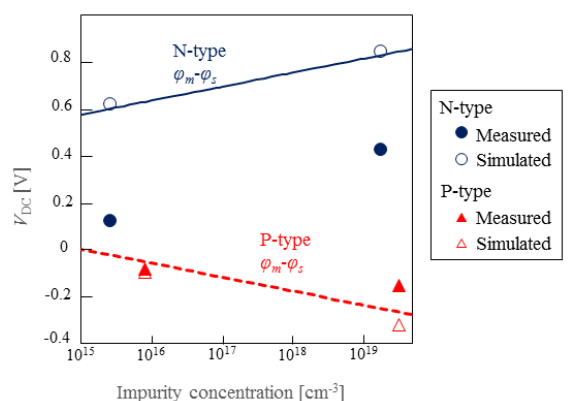


Figure 4 Simulated, measured and calculated surface voltage of doped Si as shown dots and lines respectively.

7. 参考文献

- [1] 佐藤大知, 東尾順平, 高橋芳浩, 芦澤好人, 塚本新, 上原利夫, 中川活二: 「静電気力顕微鏡を用いた半導体表面電位測定による不純物濃度分布評価」, Imaging Conference JAPAN 2014 論文集, pp. 255 ~ 258, 2014.
- [2] COMSOL Software License Agreement : “Material Library User’s Guide”, p. 51, 2013.