

# AFMによる静電気力測定に基づく半導体におけるドーパント分布評価

## Semiconductor Dopant Profiling by Electrostatic Force Detection with AFM

小林 圭  
Kei Kobayashi

<sup>a</sup> 京都大学産官学連携センター

**要旨** 原子間力顕微鏡 (AFM) を用いることで、半導体表面の構造観察だけでなく、さまざまな電気特性計測が可能である。導電性カンチレバー探針を試料に接触させて静電容量や抵抗を測定する手法は広く知られているが、ダイナミックモード AFM を用いて静電気力を測定することでも、表面電位や静電容量などの電気特性計測が可能であり、最近になって原子分解能の表面電位観察例も報告され始めている。本稿では、ダイナミックモード AFM による静電気力検出に基づく半導体デバイスの評価手法について原理を紹介するとともに、最近の動向およびドーパント分布評価の事例を紹介する。

**キーワード**：半導体デバイス、静電気力、ダイナミックモード AFM、ケルビンプローブ力顕微鏡、走査型容量原子間力顕微鏡

### 1. はじめに

集積回路の誕生以来、半導体デバイスは微細化の一途を辿り、現在では線幅 32 nm のルールで製造されたメモリやマイクロプロセッサが量産されつつある。半導体の微細化に伴い、微細加工技術だけでなく、それを評価する技術も進展してきた。微細加工技術の進展はあまりに急速であったため、本来ならば評価精度は加工精度より高いことが望まれるが、現在では、極微細加工された半導体の評価に必要な評価分解能はまだ達成されておらず、さらなる微細加工の進展の障害となっている。例えば、2008年に発表された国際半導体技術ロードマップ (ITRS) において、二次元および三次元のドーパント分布評価技術に求められる空間分解能は、2010年において 2.4 nm とされている。これは、現在あるあらゆる評価技術をもってしても達成が非常に難しい値である。ナノメートルスケールの分解能で半導体中のドーパント分布を評価することができるツールとしては、透過電子顕微鏡やそれを用いた電子線ホログラフィー法、三次元アトムプローブ法などがあるが、いずれも試料の薄片化や先鋭化などの高度な試料処理が必要となる。こうした背景のもと、SPM を用いた半導体デバイス評価技術が注目されつつある。

さまざまな SPM を用いてドーパント分布評価が可能であり、これまでに STM を用いて個々のドーパント原子の観察が達成されているだけでなく<sup>1)</sup>、AFM をベースとした走査型容量顕微鏡 (Scanning Capacitance Microscopy: SCM) を用

いたドーパント分布評価により動作中の電界効果トランジスタのキャリア分布の変化が可視化され<sup>2)</sup>、また、走査型広がり抵抗顕微鏡 (Scanning Spreading Resistance Microscopy: SSRM) による電界効果トランジスタの断面におけるドーパント分布評価において約 1 nm の分解能が達成されている<sup>3)</sup>。SCM や SSRM は、AFM の導電性先鋭探針を用いて電流や静電容量を測定するため、従来のマクロな評価手法をスケールダウンした手法といえるが、その一方で、ダイナミックモード AFM の高い力検出感度を利用して静電気力を高感度に検出することで、ドーパント濃度に依存した表面電位や静電容量を検出する手法が、より高い空間分解能と精度で非破壊にドーパント分布評価を行える手法として注目され始めている。本稿では、ダイナミックモード AFM による静電気力検出に基づいた微細化半導体デバイスの評価手法について、その原理や最近の動向について解説する。

### 2. 探針—試料間にはたらく静電気力

まず、AFM の探針と試料にはたらく静電気力について説明する<sup>4)</sup>。一般に、探針と試料との間の静電容量を  $C_{ts}$ 、探針の最先端部と試料表面との距離を  $z$  とすれば、静電気力は

$$F^{el} = \frac{1}{2} \frac{\partial C_{ts}}{\partial z} V^2 \quad (1)$$

とあらわすことができる。V は探針—試料間の電圧差であるが、探針と試料が異なる金属や半導体であれば、それぞれのフェルミレベルの差である接触電位差 (Contact Potential Difference: CPD) によって静電気力が発生することになる。ここで、試料が無限平面であり、カンチレバー探針が図 1 (a) のように近づけられているとしよう。探針先端の曲率半径を  $r$  とすれば、鏡像電荷法により

<sup>a</sup> 〒 615-8520 京都府京都市西京区京都大学桂  
TEL: 075-383-3073; FAX: 075-383-3031  
2009年5月22日受付

$$F^{el} = 2\pi\epsilon_0 V^2 \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\coth\alpha - k\coth k\alpha}{\sinh k\alpha} \quad (2)$$

となる。ただし、 $\cosh\alpha = (z+r)/r$  である。また、 $z$  が  $r$  と比べて十分に小さいとき、

$$F^{el} \approx \frac{\pi\epsilon_0 V^2}{z} \quad (3)$$

となることが知られている。図 1 (b) に、 $r=20$  nm の探針に  $V=1$  V を印加した場合の静電気力を  $z$  に対してプロットしたグラフを示す(実線)。さらに、より現実に近づけるため、探針を単なる球ではなく円錐台と半球を組み合わせた形状とし、さらにカンチレバー全体にはたらく静電気力も考慮すれば、静電気力は

$$F^{el} = \epsilon_0 V^2 \left[ \frac{\pi r^2 (1 - \sin\theta)}{z(z+r(1-\sin\theta))} + \pi k^2 \left( \ln \left( \frac{h}{z+r(1-\sin\theta)} \right) - 1 + \frac{r \cos^2\theta}{\sin\theta(z+r(1-\sin\theta))} \right) + \frac{wl}{2h^2} \right] \quad (4)$$

となる。ただし  $\theta$  は円錐台の広がり角であり、 $h$  は探針の高さである。また、 $\kappa = 1/\ln(\tan\theta)$  である。第 3 項はカンチレバー全体にはたらく静電気力をあらわすが、ここでは定数項としている。 $w$  および  $l$  はカンチレバーの幅および長さである。典型的な探針およびカンチレバーにおいて、静電気力は図 1 (b) の波線のように大きくなっていることが分かる。探針先端が試料から遠ざかると探針およびカンチレバーのマクロな形状が大きく影響することが分かる。

### 3. ケルビンプローブ原子間力顕微鏡による半導体デバイス評価

AFM において、導電性探針を用いて静電気力に起因するカンチレバーの変位を検出すれば、試料表面の電氣的な情報を二次元的にマッピングすることができる。そのような手法を静電気力顕微鏡 (Electric Force Microscopy: EFM) と呼ぶ。探針—試料間にはたらく相互作用力のうち静電気力だけを選択的に検出するため、通常は探針と試料との間に交流電圧を印加し、その周波数成分の変位だけをロックインアンプにより検出する。探針と試料との間に印加する電圧が  $V = V_{dc} + V_{ac} \cos\omega_m t$  であらわされるとき、静電気力は

$$F^{el} = \frac{1}{2} \frac{\partial C_{ts}}{\partial z} (V_{dc}^2 + V_{ac}^2 \cos\omega_m t) + \frac{\partial C_{ts}}{\partial z} V_{dc} V_{ac} \cos\omega_m t \quad (5)$$

となる<sup>5)</sup>。この式から、静電気力としては直流成分、 $\omega_m$  成分、 $2\omega_m$  成分があらわることが分かる。ここで、角周波数  $\omega_m$  の成分の振幅は

$$F_m^{el} = \frac{\partial C_{ts}}{\partial z} V_{dc} V_{ac} \quad (6)$$

となる。通常、ダイナミックモード AFM を用いて、角周波数  $\omega_m$  をカンチレバーの共振周波数より十分低い周波数に設定し、カンチレバーの変位の  $\omega_m$  成分をロックインアンプで検出する。前述した通り、探針—試料間に有限の CPD があれば  $V_{dc}$  は有限の値となるが、図 2 (a) のようにフィードバック

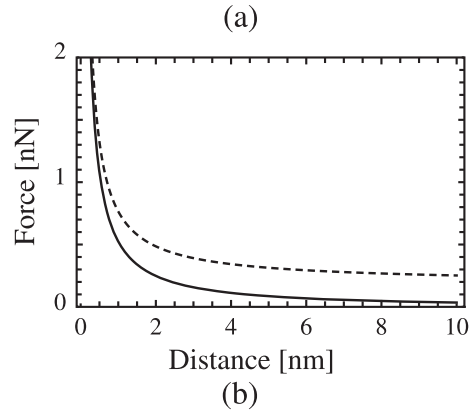
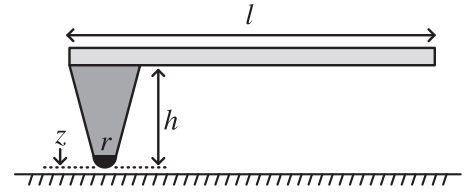


図 1 (a) 試料表面に近接したカンチレバー探針 (b) カンチレバーにはたらく静電気力  
(実線：探針先端—試料間、波線：カンチレバー探針—試料間)

ク回路を用いて、CPD を打ち消すような電圧  $V_{ctrl}$  を出力し、 $V_{dc} = V_{CPD} + V_{ctrl}$  とすれば、 $\omega_m$  成分の静電気力を常にゼロとすることができる。このとき、 $V_{CPD} = -V_{ctrl}$  であるから、探針に対する試料の CPD が測定できることになる。このように、探針に対する試料の二次元表面電位分布像を表面形状像と同時にマッピングする手法をケルビンプローブ力顕微鏡 (Kelvin-probe Force Microscopy: KFM) とよぶ<sup>6)</sup>。ただし、式 (5) の第 1 項はゼロとはならないため、 $V_{ac}$  はできるだけ小さくすることが望ましい。ここで、角周波数  $2\omega_m$  で振動する静電気力成分の係数から、探針—試料間容量を画像化できることが分かる。しかしながら、前述した通り、探針—試料間の静電容量は探針先端直下以外の部分と試料とで形成される寄生容量の寄与が大きいため、 $2\omega_m$  成分検出による容量分布測定や通常の KFM では、探針先端直下以外の部分にはたらく静電気力成分を含めて検出することになるため、あまり空間分解能を上げることができない。

一方、真空中でカンチレバーの  $Q$  値が高いことを利用して高い力検出感度を得ることができることから開発されてきた周波数変調 (Frequency Modulation: FM) 方式の AFM<sup>7)</sup> を用いれば、より空間分解能が高い表面電位像の取得が可能となる。FM-AFM において、相互作用力  $F$  によって誘起されるカンチレバーの周波数シフトは

$$\Delta f = -\frac{f_0}{kA^2} \langle F \cdot A \cos\omega_0 t \rangle \quad (7)$$

とあらわすことができる。式 (5) であらわされる静電気力に対し、角周波数  $\omega_m$  で振動する周波数シフトの成分は

$$\Delta f_m^{el} = -\frac{f_0}{kA^2} \left\langle \frac{\partial C_{ts}}{\partial z} \cdot A \cos\omega_0 t \right\rangle V_{dc} V_{ac} \quad (8)$$

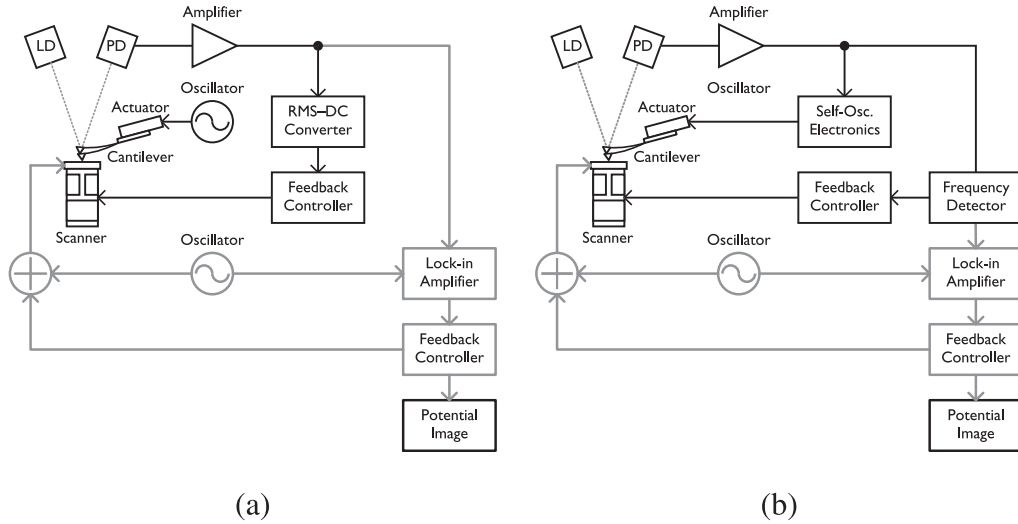


図2 ケルビンプローブ力顕微鏡 (KFM) のセットアップ  
 (a) 通常のダイナミックモード AFM を用いた KFM (b) FM-AFM を用いた KFM

となる。周波数シフトは、探針先端の位置と容量の勾配との積の時間平均値であるため、再近接点付近での静電気力を選択的に検出できる<sup>8)</sup>。この FM-AFM を用いた KFM (FM-KFM) のセットアップを図 2 (b) に示す。ただし、 $\omega_m$  は周波数検出器の追従できる範囲内に設定されなければならない。

図 3 は、市販の AFM 装置を用いて図 2 (a) に示す通常の KFM のセットアップで観察した、異なるドーピング領域を有するシリコン試料の KFM 観察例である。この試料は、P ドープによる n 型基板に B をドープした p 型領域および As をドープした n+ 型領域を形成したものであり、最終工程のエッチングにより、n+ 型領域と比較して p 型、n 型領域は高さ約 40 nm のテラス状の部分に形成されている。使用したカンチレバーはロジウム薄膜を約 30 nm コートしたシリコンカンチレバーで、バネ定数は約 2 N/m、共振周波数は約 30 kHz であった。図 3 (b) の KFM 像において、p 型お

よび n 型の領域が明瞭に区別できていることが分かる。しかしながら、KFM は表面電位を測定する手法であり、半導体ではバルクから表面に向かってのバンドの曲がりや表面準位の存在が表面電位に大きく影響するため、KFM で得られる CPD の値からドーパント濃度を決定することは非常に困難である<sup>9)</sup>。また、大気中で観察する場合には、試料表面の吸着水が表面電位に影響することが知られている<sup>10)</sup>。しかし、最近では真空中で FM-KFM を用いることで、原子分解能またはそれに近い空間分解能で半導体の表面電位を観察し、個々のドーパント原子を観察に成功した事例<sup>11,12)</sup> が増えつつあり、注目を集めている。

#### 4. 走査型容量原子間力顕微鏡による半導体評価

上で述べた通り、KFM で測定される CPD から試料内部のドーパント濃度を定量的に求めることは困難である。そこで我々は、SCM と同様に半導体試料において探針直下の容量が印加電圧に依存することを利用し、静電気力測定によって試料の微分容量分布を高分解能で観察できる走査型容量原子間力顕微鏡 (Scanning Capacitance Force Microscopy: SCFM) を開発した<sup>13)</sup>。

探針直下の探針-酸化膜-半導体 (Metal-Oxide-Semiconductor) で構成される容量は、半導体のキャリアの蓄積および空乏によって変化することが知られている。簡単のため、容量が直線的に変化する部分において、探針-試料間容量を

$$\frac{\partial C_{ts}(V,z)}{\partial z} \approx \frac{\partial C_{ts}(V_{dc},z)}{\partial z} + \frac{\partial^2 C_{ts}(V_{dc},z)}{\partial z \partial V} V_{ac} \cos \omega_m t \quad (9)$$

とあらわすことができるとすれば、式 (5) と式 (9) から、静電気力には

$$F_{3\omega} = \frac{1}{8} \frac{\partial^2 C(V_{dc},z)}{\partial z \partial V} V_{ac}^3 \cos 3\omega_m t \quad (10)$$

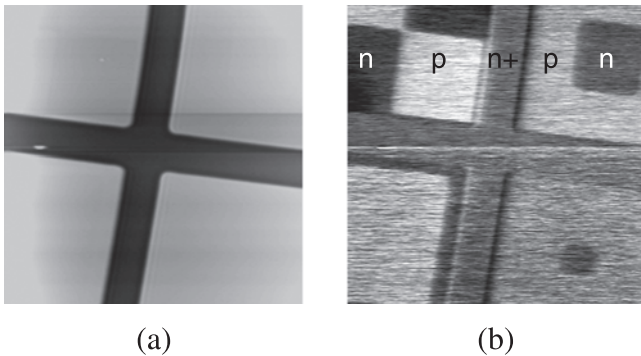


図3 KFM を用いたシリコン試料の観察例 (走査範囲:  $13 \mu\text{m} \times 13 \mu\text{m}$ )  
 (a) 表面形状像 (b) 表面電位像  
 (p 型領域: B ドープ  $2 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$ , n 型領域: P ドープ  $1 \times 10^{15} \text{cm}^{-3}$ , n+ 領域: As ドープ  $5 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$ )

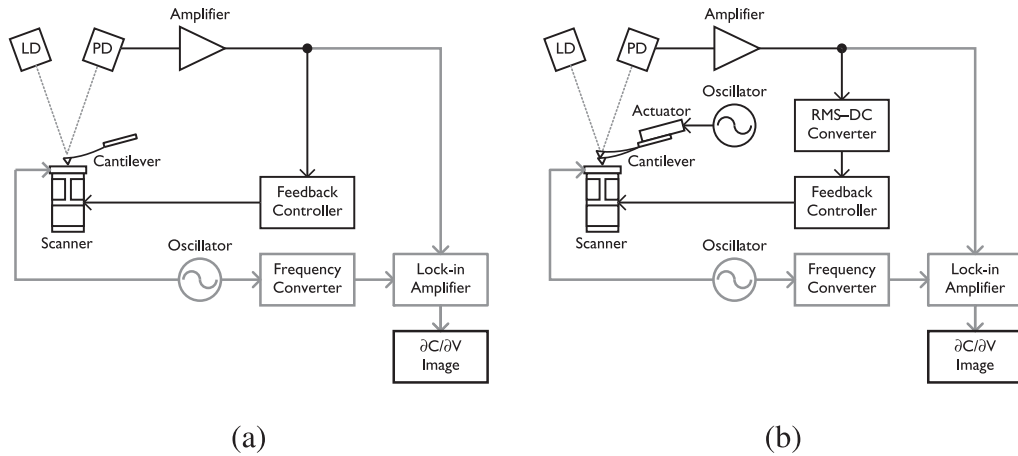


図4 走査型容量原子間力顕微鏡 (SCFM) のセットアップ  
 (a) コンタクトモード SCFM (b) ダイナミックモード SCFM

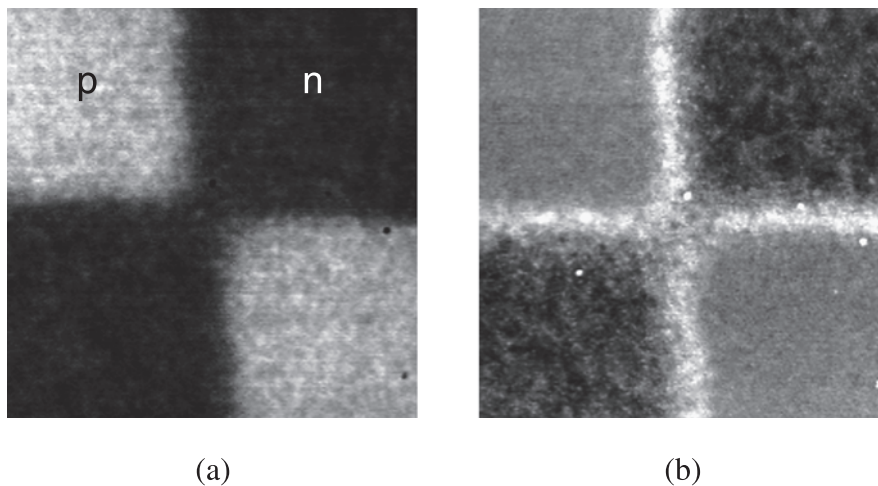


図5 ダイナミックモード SCFM を用いたシリコン試料の観察例 (走査範囲:  $2\ \mu\text{m} \times 2\ \mu\text{m}$ )

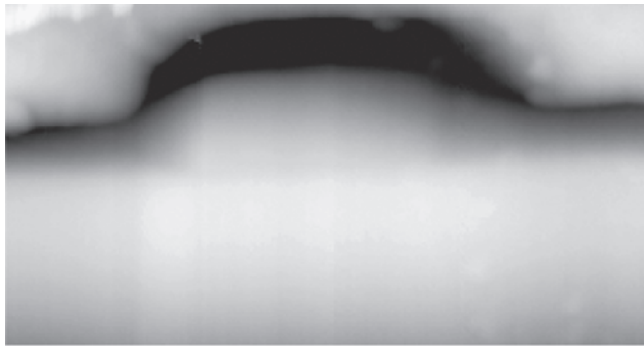
- (a) 試料に直流電圧  $V_{dc} = +3\ \text{V}$  を印加した場合  
 (b) 試料に直流電圧  $V_{dc} = -3\ \text{V}$  を印加した場合

となる  $3\omega_m$  成分があらわれることが予想される。この式より、角周波数  $3\omega_m$  で振動する静電気力成分振幅から、微分容量の大きさが、そして位相から微分容量の極性を測定できることが分かる。つまり、探針-試料間容量が交流電圧によって変調されている場合、角周波数  $3\omega_m$  で振動する静電気力成分から、探針直下の半導体中のドーパントの濃度と種類をそれぞれマッピングすることが可能となる。

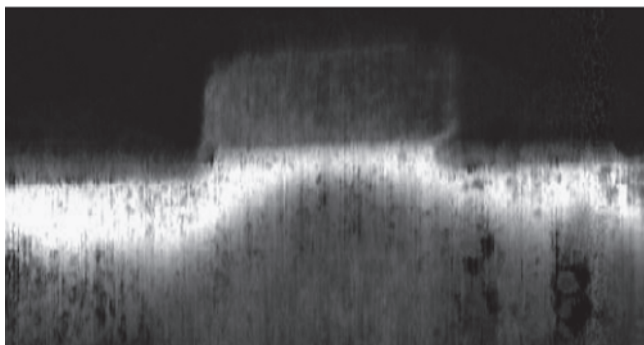
SCFM においては、角周波数  $3\omega_m$  で振動する静電気力成分を検出することが重要であり、探針-試料間距離制御はコンタクトモード AFM、ダイナミックモード AFM のいずれを用いても構わない。図 4 (a) および 4 (b) に、コンタクトモード AFM、ダイナミックモード AFM を用いた場合の SCFM のセットアップをそれぞれ示す。図 4 (a) のように、コンタクトモード AFM ではカンチレバーは試料表面に常に接触しているため、接触時におけるカンチレバーの共振周波数である接触共振周波数が  $3\omega_m$  に一致するように  $\omega_m$  を設定

すると、 $3\omega_m$  成分の静電気力を高感度に検出することができる。一方、図 4 (b) のようなダイナミックモード AFM では、カンチレバーは一次の共振周波数で振動しているため、二次共振周波数が  $3\omega_m$  に一致するように  $\omega_m$  を設定すると、 $3\omega_m$  成分の静電気力を高感度に検出することができる。

図 5 は、前述のシリコン試料のダイナミックモード SCFM 観察例である。カンチレバーの二次共振周波数は約 189 kHz 程度であったため、探針-試料間に印加する交流電圧の周波数はその 1/3 に設定した。図 5 (a) および 5 (b) は、試料に印加する直流電圧をそれぞれ  $V_{dc} = +3\ \text{V}$ 、 $V_{dc} = -3\ \text{V}$  としたときの SCFM 像であり、p 型領域と n 型領域の差が明確に現れているだけでなく、試料に印加する直流電圧に応じて境界部のコントラストが著しく変化していることが分かる。このように、SCFM 像のコントラストが試料へ印加する直流電圧によって大きく変化する現象は、従来の SCM でも同様に見られるが、これは探針直下の MOS 構造の容量が直流電圧によ



(a)



(b)

図6 コンタクトモード SCFM を用いた電界効果トランジスタ断面試料の観察例 (走査範囲:  $1.4 \mu\text{m} \times 0.9 \mu\text{m}$ )  
 (a) 表面形状図像 (b) コンタクトモード SCFM 像

て変化するためである。

次に、電界効果トランジスタを劈開し、断面を研磨して作製した断面試料を SCFM によって観察した例を図6に示す。この電界効果トランジスタのゲート長は  $500 \text{ nm}$  であり、ソースおよびドレイン領域は、p 型領域であり、直下のドーパント濃度は  $10^{20} \text{ cm}^{-3}$  であり、深さ方向に沿って  $10^{17} \text{ cm}^{-3}$  へと徐々に変化している。このソースおよびドレインと同じ行程で作製されている部分で測定した二次イオン質量分析プロファイルと、SCFM 像から得られたプロファイルは非常によく一致した<sup>14)</sup>。ソースおよびドレイン領域の下の明るいコントラストが得られている領域は、 $10^{17} \text{ cm}^{-3}$  程度とドーピング濃度が浅い領域に相当し、ゲート直下のチャンネル領域にまでこの明るいコントラストが広がっていることは、ゲート電極が n+ 型の多結晶性シリコンであり、その仕事関数がチャンネル領域より小さいために、本来 n 型であるチャンネル領域が p 型領域に反転しているためであると考えられる。

## 5. まとめと展望

本稿では、探針-試料間にはたらく静電気力について説明し、それを高感度で検出することで試料の表面電位分布や容量分布を高分解能で測定できる KFM および SCFM の原理および現状について解説した。現時点において、AFM をベースとしたさまざまな電気特性測定手法のうち、半導体デバイスの二次元および三次元ドーパント分布評価手法として、分解能および定量性の観点から、コンタクトモードで抵抗測定を行う SSRM が最も期待されている。しかしながら、SSRM が非常に高い針圧で探針を試料にコンタクトさせて走査する必要のあるのに対し、ダイナミックモード AFM をベースとした KFM やダイナミックモード SCFM は、試料に機械的・電氣的ダメージを与える可能性が少なく、再現性よく高分解能で観察できることが期待できる。今後、ITRS が要求する高い分解能と精度を実現していくためには、SPM をベースとした評価手法のどれか一つを使うのではなく、複数の手法をうまく組み合わせることが必要となるだろう。

## 文 献

- 1) Nishizawa, M., Bolotov, L. and Kanayama, T.: *Appl. Phys. Lett.*, **90**, 122118 (2007)
- 2) Kimura, K., Kobayashi, K., Yamada, H., Matsushige, K. and Usuda, K.: *J. Vac. Sci. Technol. B*, **24**, 1371-1376 (2006)
- 3) Zhang, L., Ohuchi, K., Adachi, K., Ishimaru, K., Takayanagi, M. and Nishiyama, A.: *Appl. Phys. Lett.*, **90**, 192103 (2007)
- 4) Hudlet, S., Saint Jeana, M., Guthmann, C. and Berger, J.: *Eur. Phys. J. B*, **2**, 5-10 (1998)
- 5) Martin, Y., Abraham, D.W. and Wickramasinghe, H.K.: *Appl. Phys. Lett.*, **52**, 1103-1105 (1988)
- 6) Nonnenmacher, M., O' Boyle, M.P. and Wickramasinghe, H.K.: *Appl. Phys. Lett.*, **58**, 2921-2923 (1991)
- 7) Albrecht, T.R., Gruetter, P., Horne, D. and Rugar, D.: *J. Appl. Phys.*, **69**, 668-673 (1991)
- 8) Kitamura, S. and Iwatsuki, M.: *Appl. Phys. Lett.*, **72**, 3154-3156 (1998)
- 9) Kikukawa, A., Hosaka, S. and Imura, R.: *Appl. Phys. Lett.*, **66**, 3510-3512 (1995)
- 10) Sugimura, H., Ishida, Y., Hayashi, K., Takai, O. and Nakagiri, N.: *Appl. Phys. Lett.*, **80**, 1459-1461 (2002)
- 11) Rosenwaks, Y., Shikler, R., Glatzel, Th. and Sadewasser, S.: *Phys. Rev. B*, **70**, 085320 (2004)
- 12) Ligowski, M., Moraru, D., Anwar, M., Mizuno, T. and Tabe, M.: *Appl. Phys. Lett.*, **93**, 142101 (2008)
- 13) Kobayashi, K., Yamada, H. and Matsushige, K.: *Appl. Phys. Lett.*, **81**, 2629-2671 (2002)
- 14) Kimura, K., Kobayashi, K., Yamada, H., Matsushige, K. and Usuda, K.: *J. Vac. Sci. Technol. B*, **23**, 1454-1458 (2005)