

続いて、InAs 細線構造に対して、コンタクトモード AFM および CC-KFM 測定による電流・表面電位分布の評価を行った。試料としては n ドープ GaAs (110) 面微傾斜基板上に作製したアンドープ GaAs マルチステップをバッファ層とし、アンドープ InAs がマルチステップ端へ選択的取り込み成長を起こす条件で得られた InAs 細線を用いた。この試料に対し、コンタクトモード AFM で探針・試料間を流れる電流のマッピングを行ったところ、電流が増大する領域がステップ端に沿って現れた。InAs 成長量、すなわち細線幅の異なる試料において成長量に応じた電流増大領域の増減が観測されていることから、電流増加領域は InAs 細線に対応しているものと考えられる。このような InAs 領域での電流増加は、InAs ドットで覆われた n-GaAs 基板上で報告されている GaAs/InAs 境界のショットキー障壁の低下で説明できる。続いて、この試料に対して CC-KFM を用いて表面電位分布の測定を行ったところ、負の方向に大きな電位がステップ端に沿って再現性良く現れた。この負の電位領域は前述の電流増加領域と良く一致しており、InAs 細線に対応すると考えられる。一方、InAs を成長していない GaAs マルチステップ上ではこのような電位分布は見られずほぼ一様であった。以上から、KFM 測定による材料分布推定の妥当性を示した。

一般に、KFM 測定では探針・試料間に一般的に交流バイアスを印加し、探針・試料間に生じる静電引力を取り込んでそれをフィードバックに用いることにより表面電位を求めている。通常、CC-KFM ではこの交流バイアスの振幅は数 V 程度であるが、試料表面の電位分布と試料表面近傍の電子分布に密接な関係があることを考慮すると、数 V オーダーの交流バイアスは試料表面の電子分布を乱し、数 mV 単位で評価されるべき試料表面の電位分布に影響を及ぼすことが予想される。試料・探針間距離を抑えれば、探針・試料間に印加する交流バイアスの振幅を抑えたとしても、表面電位を求めるために十分な大きさの静電引力が得られることから、真空中で測定可能な非接触型 AFM をベースとした KFM (以下、NC-KFM) を新たに構成した。この結果、従来に比べ探針・試料間の平均距離が 1 桁小さくなり、交流バイアスの振幅が従来の 1/100 以下の 10mV_{peak-peak} でも表面電位測定が可能であることを実験的に明らかにした。そこで、先に述べた InAs 細線に対して、探針・試料間の距離と InAs 細線の表面電位分布の関係について調べた。NC-KFM によって得た InAs 細線の表面電位像のコントラスト (濃淡の分布) はさきの CC-KFM で得たそれと同じであったが、表面電位の大きさについて比較したところ、CC-KFM (探針・試料間平均距離約 150 nm) では InAs 細線領域においてはその周りを取り囲む GaAs の wetting layer 領域にくらべて約 15 mV ほど負に大きな電位が得られていたのに対し、NC-KFM (探針・試料間平均距離 15 nm 以下) ではその差は約 30 mV に増大した。一般に、KFM は長距離力である静電引力を表面電位のためのフィードバックに用いるので、仮に試料表面に急峻な電位分布が存在するとしても、得られる電位値はそれらのある空間的広がり平均化したものになってしまうと考えられる。このことを確かめるために、デバイスシミュレータ ISE-TCAD を用いて探針・試料周囲の 2 次元電界強度分布を両者の間隔を変化させながら計算したところ、探針先端付近に電界集中が起こることがわかった。試料・探針間距離を変化させながら同様の計算を行ったところ、試料・探針間距離の増大に伴い試料表面の電界分布が広がることが確かめられた。これらの結果から、より正確な表面電位分布を計測するためには、探針・試料間距離を狭めることが重要であることを確認した。

以上の結果を踏まえ、探針・試料間距離を狭めるために NC-KFM を用いて、n ドープ GaAs(100) 面平面基板上の InAs 量子ドットに対して表面電位計測を行ったところ、InAs 量子ドット領域ではその周りを取り囲む GaAs の wetting layer 領域にくらべて負に大きな電位が得られた。そこで「InAs 量子ドット領域の表面電位測定値」と「ドットの周りを取り囲む GaAs の wetting layer 領域の表面電位測定値」を比較したところ、両者の差（以下、電位深さ）は、ドットの直径の増大にともない増大した。この電位深さの増大には二つの可能性が考えられる。一つは、InAs 量子ドット表面の真の電位の値がドットの大きさに依存すること。もう一つは、より正確な表面電位分布を計測するために NC-KFM を用いることで試料・探針間距離を抑えたとはいえ、探針側面の影響を完全に無視することができず、得られる表面電位値がある空間的広がり平均化したものとなっていたことである。そこで、この探針側面の影響による表面電位値の平均化の影響を調べるために、探針の形状を考慮に入れて、探針・試料周囲の 2 次元電位分布を計算し、それをもとにして試料・探針間に働く静電引力を計算するプログラムを作成した。このプログラムを用いて静電引力が最小になるような探針電位、すなわち「探針が感じる表面電位」を計算した。このような探針電位は実際の KFM 測定で得られる表面電位に対応するため、「試料表面の真の表面電位」と「探針が感じる表面電位」の関係を計算したところ、測定対象の大きさ（例えば、量子ドットの直径）が探針先端の曲率半径や探針・試料間距離より大きければ、「試料表面の真の表面電位」と「探針が感じる表面電位」はほぼ等しくなり、探針側面の影響をほぼ無視できることがわかった。また、実際の KFM 測定で得られた表面電位値を校正することにより、試料表面の真の表面電位分布を求めることができる可能性も示した。

さらに、表面電位分布を計測する際、静電引力の試料・探針間距離依存性の影響を抑えることを目的として、従来の CC-KFM に対して、その表面電位フィードバック回路にサンプル・ホールド回路を付加した KFM（以下、SH-KFM）を提案した。このシステムは CC-AFM ベースの測定系であるために構成が簡単で取り扱いも比較的容易であるにもかかわらず、表面電位計測においては実質的に NC-KFM 並みかそれ以上の高空間分解能の計測が可能になると考えられた。そこで実際に SH-KFM を構成し、さきの InAs 量子ドットに対して表面電位計測を行ったところ、InAs 量子ドット内部やドット周辺の wetting layer 部分に同心円状の電位分布が観測された。これは従来の CC-KFM や NC-KFM では観測できなかったデータであり、今回 SH-KFM によって表面電位測定の高空間分解能が著しく向上したことによって初めて得られた結果である。SH-KFM の表面電位測定における空間分解能は 10 nm 以下と見積もられ、CC-KFM ベースの KFM では世界トップレベルと考えている。さらに、試料・探針間に印加する交流バイアスも NC-KFM 並みかそれ以下に抑えられ、従って試料表面の電子分布や電位分布に与える影響も最小限に抑えられることがわかった。なお、InAs 量子ドット上で得られた同心円状の電位分布はドットやその周囲を取り囲む wetting layer のひずみに関係すると思われるが、その詳細な議論は今後の課題であると考えている。