

審査の結果の要旨

論文提出者氏名 山下 崇博

本研究は、MEMS(Micro electro mechanical system)デバイスで発生するスティクションの防止を目指し、原子間力顕微鏡(Atomic force microscope, AFM)を用いた様々な微小形状、及び材料間で発生する表面間力の測定と、実験で使用したAFMプローブ先端の微小形状を反映させた水メニスカスモデルによる表面間力の算出を行い、MEMSと同程度のスケールで発生し得る表面間力を系統的かつ定量的に評価し、それらの結果に基づいたオーミックコンタクト型MEMSスイッチにおけるスティクション防止膜の検討を示したものである。

[AFMを用いた湿度環境下における表面間力測定]

スティクション防止に関する指針を得るため、MEMSデバイスの一般的な構成材料であるシリコンや様々な金属、及びそれらの酸化膜、さらに疎水性表面を形成する自己組織化単分子膜(Self-assembled monolayer, SAM)を成膜した試料を準備し、AFMフォースカーブ測定によりそれら材料表面で発生する表面間力を系統的に求めた。接触部分の形状の違いが表面間力に与える影響を定量的に調査するため、先端曲率半径数十nm程度のティップを備えたAFMプローブの他に、ティップを備えていない平板型のプローブも使用し、平板型の可動構造体で構成されることの多いMEMSデバイスで発生する表面間力の評価にも適用可能な測定結果を取得した。これら測定は、湿度制御システムが構築されたAFMチャンバー内で行われており、湿度環境下で発生するスティクションの最も大きな原因とされる毛管力を湿度の関数として評価した。測定結果より、大気中では表面の酸化がほとんど進行しない金や白金、あるいは疎水性SAMの成膜により、構造体の形状に関わらず湿度環境下において毛管力の発生を回避できること、すなわち、毛管力に起因するスティクションを防止できることを見いだした。また、ハマカー定数の小さい疎水性SAMは、金や白金膜よりもファンデルワールス力が小さく、スティクション防止膜としてより高性能であることが明らかとなった。

[湿度環境下における表面間力の高精度な算出式の導出]

AFMを用いて測定された湿度環境下における表面間力の発生メカニズムを理論的な観点から探るために、実験で使用したAFMプローブの先端形状の違いごとに適切なプローブ先端と試料間の水メニスカスモデルを提案し、それらモデルから導出した新規のファンデルワールス力と毛管力の理論式を用いて表面間力の算出を行った。従来の研究では、湿度の関数として表した表面間力の計算値がAFMによる実測値と高精度に合致することはほとんどなかったため、構造体の水接触角と表面粗さのみ既知であれば、先端に任意の曲率半径を備えた錐体、あるいは回転楕円体形状の構造体と平板間、さらには傾きを備えた平板同士の湿度環境下における表面間力を、湿度の関数として高精度に算出することのできる汎用モデル、及び理論式を提案した点は高く評価できる。さらに、本手法を適用して算出された表面間力は、従来の研究で示されているAFMによる測定結果とも良く合致することから、提案した算出

式が広い一般性を持ち、表面間力の評価において非常に有効であることを示している。

[MEMSスイッチのスティクション防止膜の検討]

導電性が期待される π 電子共役系分子から構成され、疎水性SAMを形成する有機化合物であるチオフェノール(Thiophenol, TP), 及び2-ナフタレンチオール(2-naphthalenethiol, 2-NT)に着目し、オーミックコンタクト型MEMSスイッチのスティクション防止膜としての適用を検討した。湿度環境下における表面間力測定から、それらSAMは毛管力の発生を防止し、ファンデルワールス力についても、金薄膜の値の30~40%であることが示された。具体的には、表面粗さをRMS値で1nm程度とすることで、一般的な大きさ(数十 μm ×数十 μm)の可動電極を備えたMEMSスイッチであれば、電極間に発生する表面間力を100nN以下とできることが明らかとなった。また、一般的なMEMSスイッチのスイッチング荷重領域(100 μN 以下)における接触抵抗を測定したところ、金薄膜試料と同程度の約1 Ω であった。なお、金薄膜試料では導通までに16 μN 程度の接触力が必要であったが、SAM試料では4 μN 程度の接触力で安定的な導通が確認されたため、防汚性も明らかとなった。さらに、大気中で約 $2\times 10^4\sim 7\times 10^4$ 回の繰り返し接触まで導通不良に至ることはなく、約 7×10^3 回で不良に至った金薄膜試料よりも機械的な荷重に対する安定性が高いことを確認した。加えて、外部からの大きな負荷などのない環境下であれば、それらSAMは少なくとも約2年はデバイス表面から容易に脱離することはなく、疎水性や防汚性の効果を保ち続けることが分かった。これまで、SAMを用いたオーミックコンタクト型MEMSスイッチのスティクション防止技術は報告が無く、導電性と疎水性を兼ね備えたSAMの大気中におけるMEMSスイッチのスティクション防止膜としての適用性を示す結果が得られた点は非常に新規性が高い。

以上の結果から、本研究では、様々な形状や材料間で発生する表面間力を定量的に評価し、その値を湿度の関数として高精度に算出できる新規理論式を提案し、それらの知見に基づき導電性SAMによるMEMSスイッチのスティクション防止技術を明確に示したものであり、その独創性が高く評価された。

本研究で得られた工学的知見は極めて大きく、また、工学の発展に寄与するところは多大である。よって、本論文は博士(工学)の学位請求論文として合格と認められる。