

## 審査の結果の要旨

論文提出者氏名 曹 俊杰

本論文の目的は高周波 (RF) 回路用の高信号隔離と低電圧駆動マイクロマシンスイッチを実現するための PZT 積層膜を用いた手法の開発である。

高周波回路において、伝達する情報が大量化し、信号伝達速度の増加が求められていて、0.1 ~ 100GHz 帯周波数の信号が多く応用で使われている。そのために、高周波数信号のスイッチング特性に優れたスイッチが望まれている。一方で、従来高周波信号のスイッチング素子として用いられてきた PIN ダイオードスイッチや FET トランジスタスイッチなどの半導体スイッチと比較すると、スイッチオン状態の抵抗が低いため、インサージョンロス(挿入損失)が小さい；スイッチオフ状態のリーク信号が小さいため、アイソレーション(隔離特性)が大きい。又は、半導体スイッチより広い周波数帯(40GHz 以上)で使用可能という優れた高周波信号スイッチング特性を満たすスイッチとして、市場での期待が高まっている。この要点に着目した研究開発も 1979 年に IBM より最初で提案された MEMS スイッチからすでに行われている。しかしながら、実用に耐える MEMS スイッチは実現されていない。大きな理由は容量性接触方式の MEMS スイッチより、よく使われている  $\text{Si}_3\text{N}_4$  接触薄膜は誘電特性が低いため、Ku バンド以下に信号隔離特性が -20dB 以上を満たさない点にある。又は、長時間にスイッチング オン・オフされた後でチャージされた誘電膜は、可動接点を開離するための操作安定性に大きな影響がある。また、従来静電方式で信号開閉に使用するアクチュエータ機構によって、大きな駆動電圧の 20V 以上が必要、携帯電話、モバイル機器に実用化ができない問題がある。またこれらの研究においては高周波特性をチップ単体で評価しているため、パッケージングを施した場合とシステム回路に整合しておいても優れた高周波特性が得る事ができるかどうかについては不明であるという課題があった。従って、これから広い周波数帯で低挿入損失、高信号隔離特性の両方を兼ね備えていることがある。また、従来の静電スイッチと比較した場合、低駆動電圧と低誘電チャージ性能の実現に、高周波信号用 MEMS スイッチの開発が必要である。

そこで本研究では、始めに PZT 膜の成膜について、Sol-Gel 方と Hybrid 法について検討し、成膜した PZT 膜と PZT/HfO<sub>2</sub> 積層膜の誘電特性と圧電特性が容量性接触方式の MEMS スイッチ応用に十分なものであることを実証した。続いて、PZT/HfO<sub>2</sub> 積層膜を用いた容量性接触方式のシャント抵抗型 MEMS スイッチの設計し、このスイッチの挿入損失、隔離特性および駆動電圧の理論解析と数値計算を行った後、MEMS 微細加工技術によって試作したスイッチが、低挿入損失だけでなく、今まで発表された結果より Ku バンド以下に最高レベルの高信号隔離特性を実現した。さらに、スイッチに用いた PZT/HfO<sub>2</sub> 積層膜の信頼性評価にも言及し、従来用いられた  $\text{Si}_3\text{N}_4$  膜に比べて圧倒的に低リーク電流と低チャージ性能を測定した結果によって、低消費電力

と高信頼性を有することを実証した。さらに、MEMS スイッチの駆動電圧を低減可能なデバイスとして、容量性接触方式のシャント抵抗型 MEMS スイッチと PZT カンチレバーを集積したスイッチを提案した。理論解析と数値計算の双方によって、デザインしたスイッチが 10V 以下の低駆動電圧、Ku バンドまで優れた接触容量を示した事に関する高隔離性能を実証した。

また、さらに、スイッチのパッケージングという課題を解決することを目的とし、まず低い高周波信号損失と低クロストーク性能を求めため、低電圧駆動スイッチと低損失信号線を集積して、Au と Au の界面熱結合手法でパッケージングを含めた Single-Pole-Double-Throw (SPDT) MEMS スイッチを提案した。このような集積化がスイッチデバイスの実現に有効であることを数値計算によって、広い周波数帯の 30GHz まで低挿入損失と高信号隔離特性が可能になることを示した。一方、低損失信号線を開発するため、同じ Au と Au の界面熱結合法で信号線周囲の構造としてグラウンドシールド構造を提案し、従来の高周波信号使用的な共平面導波管の損失に比較した場合、50GHz までより小さな信号損失効果であることを実証した。

以上のように、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。