

## 審査の結果の要旨

氏名 山根 大輔

本論文は“**A Study on SOI RF-MEMS Passive Devices by Functional Layer-wise Design Method**”（邦訳：機能レイヤ分離設計法による SOI RF-MEMS 受動素子に関する研究）と題し、シリコンバルクマイクロマシニング技術により SOI (Silicon on Insulator) ウェハ上に静電駆動型の MEMS (Micro Electro Mechanical Systems：微小電気機械システム) アクチュエータと低損失なコプレーナ型 MEMS 導波路をレイヤ分離配置する新たな設計手法を提案し、当該技術を用いることで導波路とアクチュエータ間の電波干渉を抑えつつ、小型で多機能な RF-MEMS (Radio Frequency MEMS：高周波 MEMS) 型の状態可変受動素子をシリコン基板上に集積化できることを示したものであり、設計方法、作製方法、応用試作例、およびその評価方法に関して全 6 章の英文で構成されている。

第 1 章は“**Introduction**”（序論）であり、本研究の背景技術について述べている。従来のシリコン RF-MEMS 技術と SOI ウェハを用いたバルクマイクロマシニング技術による MEMS デバイスを総括し、化合物半導体よりも安価で MEMS 加工に適した単結晶シリコン基板による RF-MEMS デバイスが、SOI ウェハによる機能レイヤ分離設計により小型化・低損失化が可能であることを述べるとともに、その応用例として Ku 帯 (12-18 GHz) フェイズドアレイアンテナにおける線路切替型移相器などを取り上げ、またこれまで開発された RF-MEMS スイッチや半導体スイッチと性能を比較しつつ、本論文の目的と研究の意義、論文構成について説明している。

第 2 章は小型・低挿入損失な RF-MEMS デバイスと MEMS アクチュエータを効率良く設計・配置するために開発した機能レイヤ分離設計手法について述べている。DRIE (Deep Reactive Ion Etching：反応性イオンエッチング) による高アスペクト比シリコン深掘加工技術と金の電解めっきを用いることで、信号線とグランド面の間を、誘電損失最小の空気で絶縁分離したサスペンド型コプレーナ導波路と、表皮効果を考慮した適切な厚みをもつ厚膜金の成膜をとともに可能にする方法をレイヤ分離設計とあわせて提案し、その動作原理として、水平方向動作が可能な静電駆動型アクチュエータを用いることで 2 出力のスイッチングが容易であることを説明している。

第 3 章は機能レイヤ分離設計法により作製されたデュアル型 SPDT (Single

Pole Double Throw : 1 入力 2 出力) RF-MEMS スイッチの機械設計とその数値解析モデル、導波路とその有限要素法解析モデルについて説明したのちに、シリコンマイクロマシニング技術と金の電解めっきを融合した新たな MEMS デバイス作製方法、応答速度・機械共振周波数・S パラメータ (挿入損失、反射損失、アイソレーション)・オン抵抗やオフ容量とそれらを示す等価回路モデルを含むデバイス評価、および、これまでに報告された SPDT スイッチとの性能・サイズの比較、および、線路切替移相器を構成するために別途用意された LTCC (Low Temperature Co-fired Ceramics : 低温焼成セラミックス) 基板による多層配線回路へのフリップチップ実装評価などについて述べている。

第 4 章は遅延線と RF-MEMS スイッチが同一シリコン基板上へモノリシク加工された MEMS 移相器の設計手法を、移送量  $22.5^\circ$  移相器の 1-bit モデルから始めて  $22.5^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $90^\circ$ 、 $180^\circ$  の移相回路を含む 4-bit モデルまで拡張して説明したのちに、その作製方法、デバイス評価を述べ、第 3 章で扱った MEMS と LTCC のハイブリッド移相器と比較している。

第 5 章は“Discussion” (考察) であり、機能レイヤ分離設計法の応用可能性を移相器以外でも示す 1 つの例として、櫛歯型、および、平行平板型電極を用いた MEMS 可変容量コンデンサを提案し、RF-MEMS 状態可変素子でスイッチとともに実用化が期待されるキャパシタの設計に至る背景を簡潔のまとめのちに、アナログ操作可能な可変容量コンデンサの設計方法とその機械構造、導波路構造、Q 値や可変容量比などの各パラメータ調整方法を述べるとともに、原理検証モデルを説明している。

第 6 章は“Conclusion” (結論) であり、本論文で示した成果を総括している。

以上これを要するに、本論文は、従来は誘電損失の観点からマイクロ波応用には適していないと考えられてきた単結晶シリコン貼り合わせ基板を RF-MEMS に応用する手法として、高濃度・低抵抗シリコンと低濃度・高抵抗シリコンを貼り合わせた基板の両面に、静電駆動型マイクロアクチュエータと、誘電損失最小の空気で絶縁分離したサスペンド型のコプレーナ可動導波路をそれぞれレイヤ分離して集積配置する新たな設計手法を考案するとともに、実際にシリコン基板の高アスペクト比加工技術と、金の厚膜電解めっき技術を用いて RF-MEMS 型のスイッチ素子、移相器、可変容量素子を製作してそれらの動作を実証し、モノリシク集積型の高周波受動素子をシリコン基板のマイクロマシニング技術で実現できることを実験的に検証したものであり、電気工学に貢献するところが少なくない。

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。