

## 論文の内容の要旨

論文題目 電界電子放出電流を振動検出機構に用いた  
真空マイクロメカニカル共振子に関する研究

氏名 山下 清隆

本研究では、電界電子放出機構（FE : Field Emission）を振動の検出に用いた MEMS（Micro Electro Mechanical Systems）型の共振フィルタを提案し、振動検出の原理検証のためのデバイスの作製と、その理論的および実験的評価を行った。従来、用いられていた静電結合方式の MEMS 型高周波フィルタでは、共振子の駆動だけでなく、信号の検出も静電結合を用いているため、デバイス寸法の小型化に伴って、信号出力電流が小さくなる問題があった。本研究では、半導体微細加工技術を用いて、MEMS 共振フィルタを作製し、その振動の検出に真空マイクロエレクトロニクスにおける手段のひとつである電界電子放出機構を用いる新規な方法を提案した。真空中では、空気の粘性の影響が排除されるため、高い機械的  $Q$  値をもつ共振子の実現でき、また、搬送波となる電子の高速化が期待できる。さらに、電界電子放出機構にはデバイス寸法の小型化にともなって、出力電流が大きくなる特徴がある。以上から、無線通信機器に搭載する周波数フィルタの小型化、低コスト化、低消費電力化を実現することが本研究の目的である。

本論文では、まず序論で本研究の背景である RF フィルタの無線通信機器における役割と現状を述べた。次に、MEMS のさまざまな応用例を挙げ、その中で高周波応用に着目し、携帯電話への応用の可能性について述べた。とりわけ、バンドパスフィルタの置き換えに着目し、MEMS の共振フィルタへの応用の利点と問題点を挙げた。また、本研究の目的と意義を明確にした後、研究の方法論と成果を示した。最後に、本論文の構成を図とともに説明した。

第2章では、電界電子放出機構を機械的振動の検出に用いた MEMS 共振フィルタを提案した。主要な電子放出機構について理論を論じ、特徴を比較することで、本研究で採用した電界電子放出機構の優位性を示した。また、デバイスサイズに対するスケーリングから、本研究で提案した MEMS 共振フィルタと、従来の MEMS 共振フィルタに用いられている静電容量結合方式や、固体素子フィルタを比較し、今後のデバイスの小型化・高周波数化に合うデバイスであることを示した。さらに、本研究の設計論を歪み振動を持つ *Lame* 共振子を用いて論じ、最終目標値を挙げた。また、目標値を主眼とした電界電子放出電流の電気機械的変調のシミュレーションを行い、電界放出電流が 1 nm の変位感度を持つことを示した。

第3章では、シリコンバルクマイクロマシニングを用いて、MEMS 微小真空管の設計、製作、および測定を行った。電界電子放出ティップの先鋭化について、本研究で採用した TMAH シリコン異方性ウェットエッチングを用いた。他のティップの先鋭化法と比較することで、この方法の優位性を示した。また、一回のフォトリソグラフィと Deep-RIE で、電界電子放出電流の原理検証デバイスを作製できることに成功した。さらに、電界放出電極に囲まれた空間を狭くする

ことで、より大きな電界電子放出電流を得たことに成功した。

第4章では、シリコン MEMS 技術を用いて、電界電子放出電流を電気機械的に変調する原理検証実験を行った。原理検証用の共振子を組み込んだデバイスの設計、製作、結果および測定を行った。製作の際、Vapor-HF で犠牲層をエッチングし共振子をリリースすることを除いて、MEMS 微小真空管の作製プロセスと同じ方法で作製することに成功した。また、駆動電極に直流および交流信号を印加することで、電界電子放出電流を MEMS 微小共振子の静特性によって電気機械的に変調することに成功した。さらに真空中での共振測定から、ゲイン特性を測定し、本デバイスのフィルタリングの可能性を示した。

第5章では考察として、シリコンデバイス表面（活性層）にさまざまな金属を蒸着した時の、電界電子放出電流の改善と安定性についての測定を行った。また、電界電子放出電流の測定の際に問題になったリーク電流について、等価回路を用いて考察を行った。その際、真空中で得られた電流から、大気中で測定した電流を差分し、加えて最小二乗法により抵抗性のリーク分を差分することで、電界電子放出電流の成分のみを取り出すことに成功した。さらに、第4章で得られた電界電子放出電流の電気機械的変調の結果について、大気中でのレーザードップラー変位計を用いた結果や、変調シミュレーションから、電気機械的変調の妥当性を示した。そして、測定された共振周波数と設計時のシミュレータによる共振周波数が一致しない点についての考察を行った。梁の断面形状や、梁に沿った分布質量を考慮して計算し、それぞれの結果を比較することで、梁の断面形状は、サブミクロン程度の差であれば、長方形近似で見積もることができることを示した。また、測定時に問題となるノイズについて、ショットノイズと熱ノイズを挙げ、ショットノイズの影響が大きいことを示した。その原因はトンネル確率によるゆらぎであり、FE 電流と直接トンネル電流を比較し、FE 電流の方が、ショットノイズの影響を受けにくく、このことが共振子の振動検出に FE 電流を用いる利点の一つに挙げた。

第6章は本研究の結論と今後の展望を記述した。

以上が本論文の内容の要旨である。