

審査の結果の要旨

氏名 邱博奇

マイクロ波と赤外光の間の周波数帯に位置するテラヘルツ電磁波は、基礎研究のみならず、様々な産業応用、安全・安心分野の計測に重要な周波数となりつつある。テラヘルツ電磁波技術が社会に普及するためには、半導体デバイスを用いたコンパクトな光源や検出器の開発が不可欠である。光子エネルギーが小さいテラヘルツ領域では、入射した電磁波を一旦熱に変換する熱型検出素子が広く用いられている。そのような中で、近年、半導体微細加工技術を用いて実現されるマイクロ電気機械素子 (microelectromechanical system ; 以下 MEMS と略す) が持つ機械的共振周波数が、敏感に梁の熱膨張に依存することを利用した MEMS ボロメータが注目を集めている。本論文は、“Strain tuning and piezoresistive detection in MEMS beam resonators for terahertz bolometer applications” (テラヘルツボロメータ応用に向けた MEMS 梁共振器構造における歪みチューニングとピエゾ抵抗効果に関する研究) ”と題し、MEMS 両持ち梁共振器構造に導入する歪みやピエゾ抵抗効果を用いることにより、テラヘルツ検出素子の高感度化を行った研究成果についてまとめられている。論文は6章より構成されており、英文で記されている。

第1章は序論であり、本研究の背景と目的について述べられている。テラヘルツ領域における検出素子が、光伝導素子、整流素子、熱型素子に分類すること、特に広い分野への普及のためには、室温動作・広帯域の熱型検出器の重要性を述べている。特に、最近提案された MEMS 技術を用いたテラヘルツ熱型センサー (MEMS ボロメータ) が、高感度、高速性も兼ね備えた素子であり、MEMS ボロメータをさらに高性能化することを研究の目的とすることが述べられている。

第2章では、MEMS 両持ち梁構造の機械的共振特性の定式化がなされており、MEMS 梁の共振周波数がどのような物理量で与えられるか、梁にテラヘルツ電磁波が入射し熱に変換したときに、梁の熱膨張効果により共振周波数がどのように変化するか等が基本方程式を用いて説明されている。さらにそれを用いて、素子の感度 (responsivity) を決定する物理量などが議論されている。

第3章では、梁の初期曲がり が MEMS ボロメータの感度に与える影響について論じている。MEMS 両持ち梁構造では、梁の両端が固定されているため、熱の印加により梁を熱膨張させていくと、やがて梁は座屈を起し、変形する。この時、全く初期曲がりのない平坦な梁であれば、理論上は座屈を起す臨界点では共振周波数はゼロまで低下する。しかし、一般にはわずかに梁に初期曲がりがあるため、共振周波数はゼロまで低下せず、応力と共振周波数の関係はなだらかなものとなる。熱膨張による共振周波数の変化を信号とする MEMS ボロメータでは、熱応力と共振周波数の関係がなだらかなること

とは感度の低下に繋がるため、梁の初期曲がりの原因を解明するとともに、それを抑制する方法を見つける必要がある。本章では、MEMS 梁の長さや感度の関係を系統的に調べるとともに、梁となる GaAs 層に 1%リンを加えた GaAsP 梁構造を作製し、梁に引っ張り応力を導入することにより、理論通りの感度が得られることを示した。さらに、引っ張り応力を導入しても残留する初期曲がり効果があり、それが梁の表面に形成するメサ構造や電極構造の厚さと強い相関があり、できるだけ梁表面の凹凸を抑制することが高感度化に重要であることを示した。

第 4 章では、梁に積極的に圧縮歪みを導入し、MEMS ボロメータの高感度化を実現した成果について述べている。上述したように、梁に圧縮歪みが印加されると共振周波数は低下するが、その時、応力と共振周波数の関係の傾きも増大する。この効果を用いれば、MEMS ボロメータを高感度化できる可能性がある。本研究では、梁層に 0.4%の In を加えることにより梁に圧縮歪みを導入しつつ、梁の長さを系統的に変化させ、座屈が起きる臨界条件を実現すると、共振周波数が急激に低下するとともに、感度が無歪みの梁のそれに比べて約 15 倍増大することを見出している。この座屈を起こす臨界条件近傍に MEMS ボロメータの動作点を移動させることによる高感度化は、素子の検出速度を劣化させないで高感度が得られる方法であり、素子の高性能化に有効である。

第 5 章では、MEMS 梁の振動からの rf 信号の検出方法について検討している。MEMS 梁が振動するとき梁の振幅に比例した電氣的出力を得るために、従来は梁表面と梁内部に形成された伝導層の間に発生するピエゾ容量効果による電圧を、バッファートランジスタを介して計測していた。本研究では、ピエゾ容量効果ではなく、p 型 AlGaAs/GaAs ヘテロ構造に蓄積する 2 次元正孔のピエゾ抵抗効果を用いることにより、バッファートランジスタを用いなくても、梁から得られる rf 信号の大きさを 1,000 倍程度増大させることに成功している。ピエゾ抵抗効果を用いることができれば、梁を縮小して高速化をする場合でも、信号の大きさを保つことができ、応用上非常に有効な成果である。

第 6 章は結論であり、博士論文全体を通してのまとめが記されている。

以上のように本論文は、MEMS 両持ち梁構造の機械的共振周波数が梁の熱膨張に非常に敏感に反応するという効果を用いた MEMS ボロメータ素子に関して、梁の変形や内部応力が感度に与える影響を定量的に明らかにするとともに、梁に導入する格子歪みを精密に制御することにより素子の高感度化を行うとともに、ピエゾ抵抗効果を用いて梁の振動からの rf 信号の高出力化を提案・実証したものであり、テラヘルツ検出素子の高性能化を通して電子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。