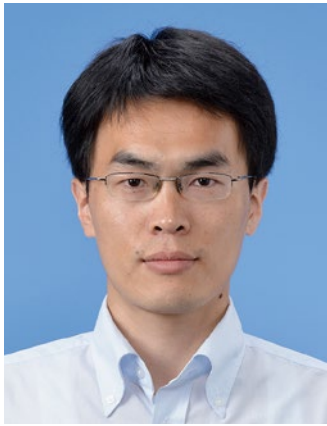


丸文研究奨励賞 受賞者



張 亜
東京農工大学 大学院工学研究院
准教授(テニュアトラック)

MEMS共振器の熱伝導と振動モードの制御による高感度テラヘルツ検出

マイクロ構造の機械的な自由度から未開拓のテラヘルツ領域を拓く

研究の背景

テラヘルツ領域の分光・検出技術は、基礎科学、医学・薬学、製造業、安全・安心分野など様々な分野への応用が注目されています。また、近年では、装置の小型化・高性能化が進み、実験室における計測器という使われ方から、生産現場や医用応用などオンサイトで用いられる小型ポータブルな測定器という展開も急速に進んでいます。このようなテラヘルツ領域の計測技術を、社会の様々な場面で広く応用展開していくためには、極低温への冷却を必要としない高感度・高速のテラヘルツ検出器の開発は必要不可欠です。光子エネルギーが非常に小さいテラヘルツ領域では、光を一旦熱に変換し、温度上昇による抵抗の変化などを信号として用いるボロメータ技術が有効です。一般に、基礎研究に用いられるボロメータは、極低温における半導体や超伝導体などの抵抗の温度依存性を信号として用いるため、大がかりな冷却が必要となり、実用的ではありません。従って、テラヘルツ光を、半導体などの抵抗変化として読み出す原理を用いる限り、室温動作かつ高感度の検出器を実現するのは極めて困難です。この問題を克服するためには、発想を全く変えて、抵抗変化ではない物理量をテラヘルツ光検出に用いることが有効です。

研究の成果

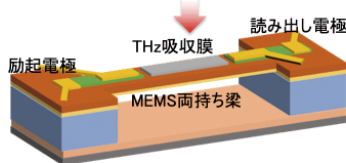
本研究によって得られた主な成果を、以下の4項目にまとめました。

1. 微小電気機械システム共振器を用いたテラヘルツ光検出
近年盛んに研究がなされるようになった

微小電気機械システム(MEMS)共振器とは、半導体微細加工技術を用いて作製される機械的な自由度を持ったマイクロ構造です(図1a)。我々はMEMS共振器の機械的共振周波数という新しい物理量を用いて、コンパクトで高感度・高速なテラヘルツ検出用ボロメータ(以下、MEMSボロメータという)を実現しました。テラヘルツ電磁波の入射による両持ち梁の温度上昇を、その共振周波数の変化で読み取るという検出原理を用いて、高感度かつ高速なテラヘルツボロメータを実現しました[1,2]。当該MEMSボロメータは、従来用いられてきた抵抗や静電容量の変化を利用したセンサに比べて、同等の感度を有しつつも、検出速度が100~1,000倍も速いことが明らかになってきました(図1b)[3]。

図1 室温動作する高感度・高速MEMSテラヘルツボロメータ

(a) MEMSボロメータの構造



(b) MEMSボロメータ(左)と焦電センサ(右)で取得したテラヘルツ画像



図2 多孔性フォノンニック構造によるMEMS梁の熱伝導の制御

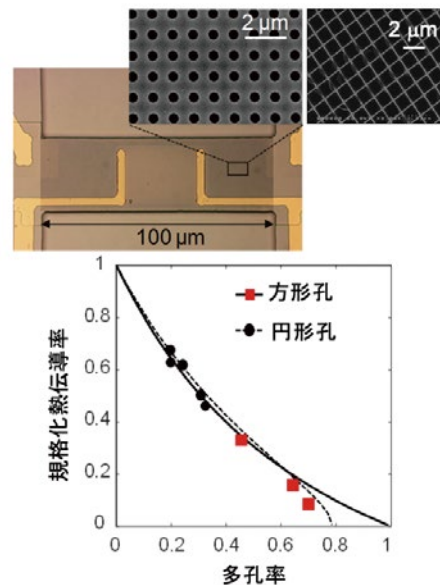


図3 振動モードの結合による超高感度の実現

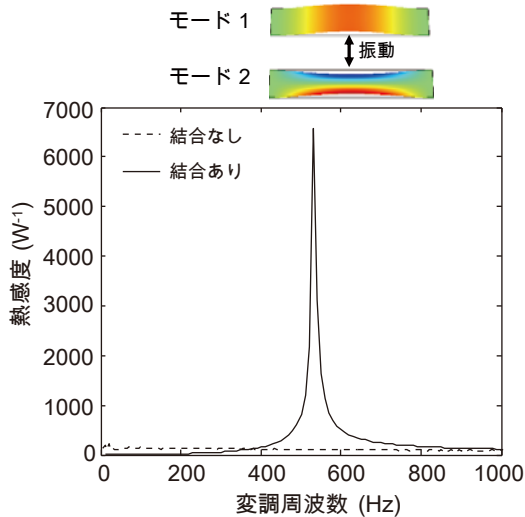
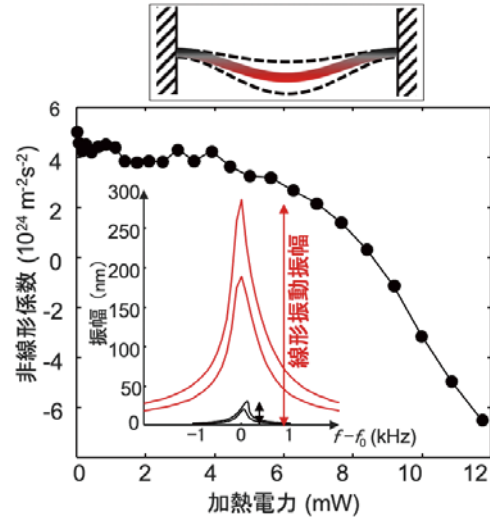


図4 熱効果によるMEMSの機械的非線形性の制御



2. 多孔性フォノン構造によるMEMSボロメータの感度向上

一般に、ボロメータの熱感度は構造の熱伝導に反比例します。従来のボロメータでは、高い感度を得るために、熱伝導度を低下させていましたが、一方で熱時定数が長くなり、検出速度は感度とトレードオフの関係にありました。この問題を解決するために、我々は、多孔性フォノン構造をMEMSボロメータに導入しました(図2) [4]。多孔性フォノン構造はMEMS梁の体積を大きく減らすことができるため、MEMS梁の熱伝導だけでなく、熱容量も減少させます。そのために、光の検出速度を維持するとともに熱感度を大幅に向上させることができます。我々は、多孔率(気孔の体積の割合)が0.7のMEMS梁を作製し、梁の熱伝導を90%低減させるとともに、MEMSボロメータの熱感度を10倍以上向上させることに成功しました[5]。

3. 振動モードの制御による理論限界までの感度実現

我々は、MEMS梁に内在する力学的な非線形性により生じる梁の振動モード間の相互作用が、非常に大きな熱感度増大をもたらすことを発見しました。MEMS両持ち梁には様々な振動モードが存在しますが、系に非線形性が存在すると、モード間の結合が生じ、入力する熱を特別な周波数で変調すると、数十倍も大きな熱感度が得られることが確認できました(図3) [6]。このことは、テラヘルツ検出への応用に限らず、他のセ

ンシング用途や、フォノンによる量子情報転送などの幅広い分野にも可能性を秘めるため、応用的に重要であるだけでなく、学術的にも重要な知見をもたらすものです。

4. 機械的非線形性の制御によるMEMS出力信号の改善

一般的なMEMS両持ち梁構造は、振動振幅が増大するにつれ、梁がより伸張され、材料が硬くなる性質があります。従って、振動振幅の増大とともに共振周波数は上昇し、非線形性を示します。そのため、線形振動領域を保つためには、振動振幅は数十ナノメートル程度の非常に小さい値にする必要がありました。我々は、MEMS梁に薄膜抵抗を作製し、それを利用してMEMS梁を電氣的に加熱することによって、MEMS梁の非線形性を強く低減できることを発見しました。非線形性が制御されたMEMS素子においては、線形領域の振動振幅を、非線形性を制御していないMEMS素子のそれに比べて、10倍以上に増大できることを確認しました(図4) [7]。この成果を用いて、

MEMS素子の信号対雑音比を大幅に向上させることができるため、超高感度センシングへの応用展開が期待できます。

将来の展望

これまでの研究で、MEMSの機械的共振周波数という新しい物理量を用いて、コンパクトで高感度・高速なテラヘルツ検出用ボロメータを開発するとともに、熱伝導や振動モードの制御により素子の性能を大幅に向上させることに成功しました。上記の一連の研究成果は、生産や医療現場など、社会の様々な場面で使用できる次世代のテラヘルツ・赤外計測装置の開発に貢献することが期待されます。

謝辞

本研究は多くの方々のご協力のもとに行われたものです。東京大学生産技術研究所の平川一彦先生、東京農工大学の越田信義先生をはじめ、国内外の共同研究者の皆様に深くお礼申し上げます。

References(参考文献)

- [1] Y. Zhang, Y. Watanabe, S. Hosono, N. Nagai, and K. Hirakawa, Appl. Phys. Lett. 108, 163503 (2016).
- [2] Y. Zhang, S. Hosono, N. Nagai, S.-H. Song, and K. Hirakawa, J. Appl. Phys. 125, 151602 (2019).
- [3] I. Morohashi, Y. Zhang, B. Qiu, Y. Irimajiri, N. Sekine, K. Hirakawa, and I. Hosako, Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves 41, 675 (2020).
- [4] Y. Zhang, B. Qiu, N. Nagai, M. Nomura, S. Volz, and K. Hirakawa, AIP Advances 9, 085102 (2019).
- [5] R. Yamamoto, A. Kojima, N. Koshida, I. Morohashi, K. Hirakawa, and Y. Zhang, Sensors 22, 5109 (2022).
- [6] Y. Zhang, R. Kondo, B. Qiu, X. Liu, and K. Hirakawa, Phys. Rev. Appl. 14, 014019 (2020).
- [7] Y. Zhang, Y. Yoshioka, M. Iimori, B. Qiu, X. Liu, and K. Hirakawa, Appl. Phys. Lett. 119, 163503 (2021).