

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 28 日現在

機関番号：12601

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2016

課題番号：15K13966

研究課題名(和文) MEMS共振器構造を用いた非冷却高感度テラヘルツボロメータの開拓

研究課題名(英文) Uncooled, high-sensitivity terahertz bolometer using MEMS resonators.

## 研究代表者

平川 一彦 (Hirakawa, Kazuhiko)

東京大学・生産技術研究所・教授

研究者番号：10183097

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、テラヘルツ電磁波の吸収で誘起されるわずかな温度上昇を、MEMS両持ち梁構造の共振周波数のシフトとして高感度に読み取ることが原理とする室温動作テラヘルツ検出用ボロメータの原理実証を行うことを目的として研究を行った。その結果、室温動作する他の熱型テラヘルツ検出器と同程度かそれ以上の感度を有することが示せた。さらに、テラヘルツ入射による共振周波数のシフトを追いかけるようにフィードバックをかける周波数変調(FM)検出を用いた場合、従来の室温動作テラヘルツ検出器の100-1000倍の高速動作が可能であり、MEMS共振器を用いた新しい原理のボロメータの有用性を確認することができた。

研究成果の概要(英文)：We have fabricated and demonstrated a new type terahertz bolometer based on a doubly clamped MEMS beam resonator. This bolometer operates at room temperature and detects the shift in the resonance frequency of the MEMS beam due to heating by terahertz radiation. The present bolometer has a sensitivity comparable to or better than that of conventional room-temperature operated terahertz sensors. Furthermore, when a frequency-modulation (FM) detection scheme that tracks the resonance frequency by applying a feedback loop is used, a fast detection speed which is 100-1000 times higher than that of other room-temperature thermal sensors are obtained, demonstrating the usefulness of our novel terahertz bolometer based on the MEMS beam resonator.

研究分野：quantum semiconductor electronics

キーワード：テラヘルツ MEMS 検出器 ボロメータ

### 1. 研究開始当初の背景

基礎科学や安全・安心分野などへの応用が注目されているテラヘルツ電磁波技術では、電磁波の検出はフェムト秒レーザーパルスなどの同期信号を用いた検出か、光伝導素子や熱型センサー（ボロメータ）により行われてきた。同期信号を用いる検出は、システムが複雑で、集積化は困難である。また光伝導素子やボロメータなどの非同期検出においては、半導体や超伝導体の抵抗変化を信号として用いるため、室温で動作するような簡便な検出器は、酸化バナジウム（VOx）の相転移を利用した素子以外、ほとんど存在しない状況にある。

しかし、テラヘルツ技術を基礎研究や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・高速なテラヘルツ検出技術の開発は必要不可欠である。また、安全・安心分野ではイメージングも重要な技術であり、テラヘルツカメラに展開できるような集積化が可能な素子構造を実現することも非常に重要である。

### 2. 研究の目的

MEMS 機械振動子構造においては、そのたわみ振動モードにおいて、室温でも数千~1万程度の高いQ値が実現されている。この高いQ値の共振特性は、室温でも高感度に周波数変化を読み出すのに非常に有効である。また、微小な MEMS 構造では熱容量が小さいため、テラヘルツ検出ボロメータとして用いたとき高速動作が期待できる。また、半導体技術を用いて作製できるため、集積化も容易である。

本研究では、テラヘルツ光吸収で誘起される発熱によるわずかな温度上昇を、MEMS 両持ち梁構造の共振周波数のシフトとして高感度に読み取ることを原理とする全く新しい原理の高感度・非冷却テラヘルツ検出用ボロメータの原理実証と試作を行うことを目的とする。

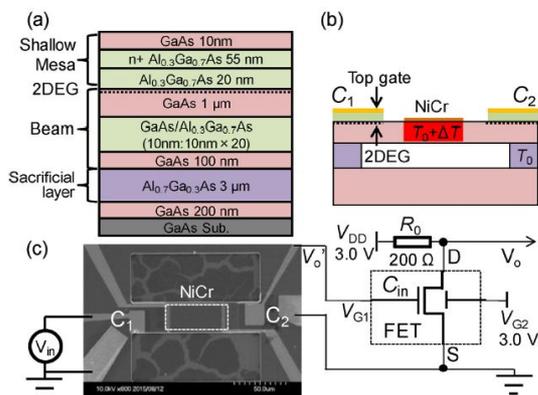


図1 本研究で検討を行った MEMS 両持ち梁構造ボロメータと測定回路

### 3. 研究の方法

上記の研究目的を達成するために分子線エピタキシー法を用いて GaAs/AlGaAs 系ヘテロ構造を成長し、MEMS 両持ち梁構造を作製し、梁の形状が共振周波数や Q 値に与える影響を系統的に理解する。さらに、テラヘルツ電磁波の入射による梁の温度上昇を模擬するために、梁中央部に NiCr のヒーターを形成し、MEMS ボロメータの動作原理の実証と感度の較正を行う。

具体的には、

#### (1) 長さの異なる MEMS 両持ち梁構造の作製

MEMS 両持ち梁構造の共振周波数や熱入力に値する感度は梁の長さなどの形状に非常に強く依存することが知られている。一般に MEMS 梁の長さ  $L$  を長くすると共振周波数は下がり、共振器の Q 値は増加することが報告されている。しかし、長い梁を作製する場合、犠牲層をエッチングして梁を作製する時にスティクションと呼ばれる問題が発生する。本研究では、800  $\mu\text{m}$  程度の長い梁の作製も可能なように、超臨界乾燥技術を習得し、系統的に異なる形状の AlGaAs/GaAs ヘテロ構造をベースとした両持ち梁構造の作製を行う。

#### (2) MEMS ボロメータ構造の感度・雑音の評価

ボロメータの動作を模擬するために、MEMS 両持ち梁の表面に NiCr 薄膜ヒーターを堆積し、熱の入力に対する本 MEMS ボロメータの感度および雑音の精密な評価を行う。

#### (3) 信号読み出し方法に関する検討

信号の読み出し方としては、共振スペクトルの近傍に駆動周波数をセットし、熱入力による共振ピークのシフトを振幅の変化として読み出す slope 検出が一般的である。しかし、大きな熱入力で共振周波数が大きくシフトすると感度を失うという問題や信号読み出しの速度が Q 値で律速されてしまう問題がある。

AFM の分野では slope 検出とともに、共振周波数のシフトを直接読み出す FM 検出という方法が知られている。FM 検出においては、大きな熱入力に対しても周波数シフトを読み出せるので大きなダイナミックレンジが取れるという利点と、梁の振動振幅を変えずに共振周波数のみ読み出すため、Q 値で動作速度が律速されることがないと期待される。この 2 つの信号読み出し方を検討し、その特性を明らかにする。

### 4. 研究成果

#### (1) MEMS 両持ち梁構造の最適化

簡単な見積もりより、感度  $R$  は梁の長さ  $L$ 、および梁の厚さ  $t$  に関して、 $R \propto (L/t)^3$  の依存性を持つことが期待される。そこで、 $L = 100\text{-}800 \mu\text{m}$ 、 $t = 0.5$  または  $1.2 \mu\text{m}$  の範囲で構造を変化させ、共振周波数や感度の検討を行った。

その結果、 $L < 200 \mu\text{m}$  以下の領域では、共振周波数、感度は予想通りの振る舞いを見せるが、 $L > 200 \mu\text{m}$  の領域では、共振周波数も感度も理論予測からずれることがわかった。

この理論的な予測との差異は、GaAs と AlGaAs の間の微小な格子定数の差により梁内部に存在する残留応力の影響が大きいと思われる。また、ピエゾ効果で梁を駆動・検出するために形成するメサ構造部分の高さが違うことが、機械的な初期曲がりと同じ効果を及ぼし、それが感度の低下を招くこともわかってきた。従って、梁の長さ  $L$  は  $200 \mu\text{m}$  以下、また厚さ  $t$  は  $1 \mu\text{m}$  程度が望ましいことがわかった。

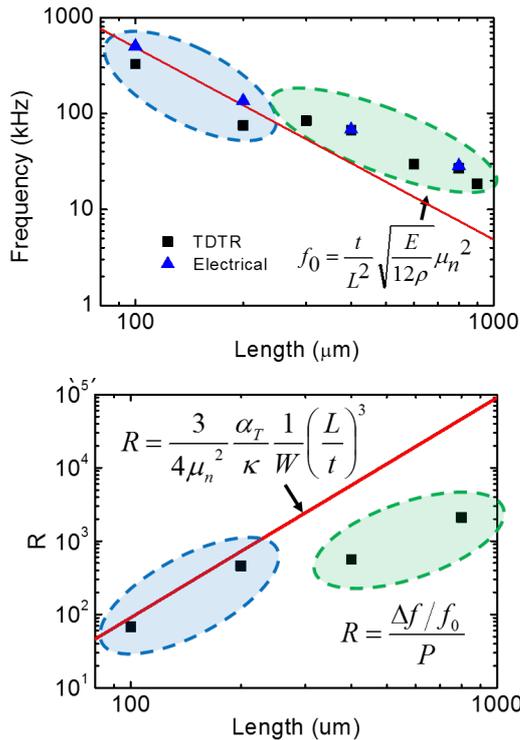


図2 (上)異なる梁長さを持つ MEMS 共振器の共振周波数、(下) MEMS ボロメータの感度  $R$

(2)MEMS ボロメータ構造の感度・雑音の評価

ボロメータの動作を模擬するために、MEMS 両持ち梁の表面に NiCr 薄膜ヒーターを堆積し(図1参照) 精密な熱の入力に対する本 MEMS ボロメータの感度および雑音の評価を行った。測定は、MEMS 共振スペクトルのピークの近傍に駆動周波数をセットして、熱入力に対して振動振幅の変化を見る slope 検出法で行った。

Slope 検出の場合、梁の駆動振幅に比例して信号が増加するが、大きな振幅で梁を駆動すると非線形効果により共振スペクトルがローレンツ型からずれ、駆動電圧がさらに大きくなると共振スペクトルが双安定性を示すようになり、検出器として適切に動作しなくなる。今回、双安定性を示す駆動電圧より少し小さな電圧で駆動した場合の感度  $R$ 、雑音、NEP のスペクトルを図3に示す。

今回、 $L = 120 \mu\text{m}$  の試料で実験を行ったが、最大の  $R$  として  $3000 \text{ V/W}$  という冷却ボロメータに匹敵する高感度を達成することに成

功した。一方、ノイズは、ほぼフラットな特性を有する電氣的なノイズに加えて、共振周波数における振動揺らぎの雑音ピークが観測された。

これらを考慮した結果、最小の NEP として  $20 \text{ pW/Hz}^{0.5}$  という値を達成できた。この値は、駆動電圧や駆動周波数を調整して得られた最小値であるが、非常に有望な値であると言える。

さらに、梁の長さ  $L = 210 \mu\text{m}$  の MEMS 両持ち梁を用いて感度を求めたところ、 $L = 120 \mu\text{m}$  の素子に比べ、おおよそ期待通りの約 3.4 倍大きな  $R$  を得た。今後、素子構造の最適化をさらに進めていく予定である。

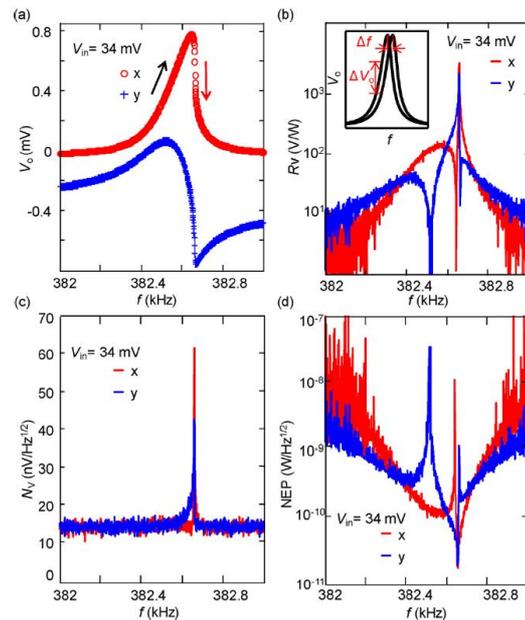


図3 (a)MEMS 共振器の共振スペクトル、(b) 感度スペクトル、(c)雑音スペクトル、(d) 雑音等価パワーNEP

(3)信号読み出し方法に関する検討

我々が提案している GaAs MEMS 両持ち梁構造は、室温でも  $Q \sim 5,000$  程度の高い  $Q$  値を示す。これまで、MEMS 共振スペクトルの近傍に駆動周波数をセットし、熱入力による共振ピークのシフトを振幅の変化として読み出す slope 検出を行ってきた。Slope 検出は感度が高いものの、信号読み出しの速度が  $Q$  値で律速されてしまい、読み出し動作速度が数十 Hz 程度の非常に遅い値になると言う問題、

大きな熱入力で共振周波数が大きくシフトすると感度を失うという問題(狭いダイナミックレンジ)があった。

この問題を解決するには、信号を梁の振幅から得るのではなく、共振周波数のシフトそのものを測定する周波数変調 (FM) 検出が望ましいことが、AFM 分野の研究などからわかってきている。そこで我々は位相同期回路 (phase locked loop; PLL) を導入し、信号検出の高速化を目指した。

図4は、参考のために測定した slope 検出

による信号波形を、入力 ON, OFF の周波数を変化させて測定したものである。図からわかるように、入力信号の ON, OFF 切り替えの直後、過渡波形が現れ、入力変調周波数が数十 Hz で信号も減衰していくことがわかる。

一方、PLL を用いた FM 検出を用いて共振周波数のシフトを電圧として出力させると、図 5 に示すとおり、入力信号の ON, OFF が 5 kHz になっても明瞭に信号が観測できていることがわかる。この 5 kHz という検出スピードは、室温動作の熱型テラヘルツ検出器としては従来の素子の約 100~1000 倍も速いものであり、本 MEMS ボロメータの優位性を示す結果である。

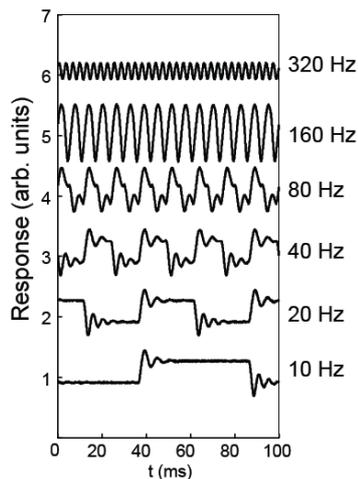


図 4 入力信号を ON/OFF したときの slope 検出における信号波形

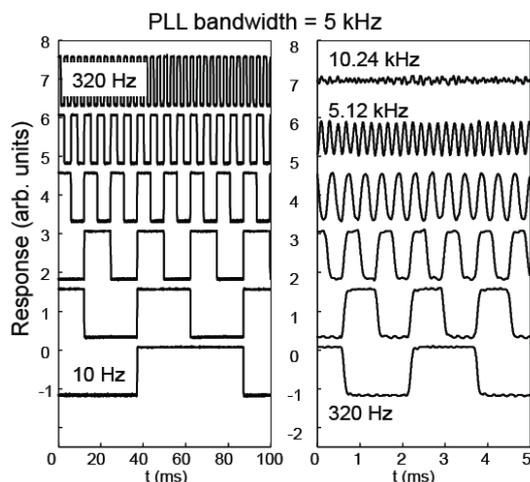


図 5 入力信号を ON, OFF したときの FM 検出における信号波形。約 5 kHz までも明瞭に信号が観測される。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 1 件)

(1) Y. Zhang, Y. Watanabe, S. Hosono, N. Nagai, and K. Hirakawa: “Room temperature, very sensitive thermometer using a doubly

clamped microelectromechanical beam resonator for bolometer applications”, Applied Physics Letters, vol. 108, pp. 163503-1-4 (2016), DOI: 10.1063/1.4947444.

〔学会発表〕(計 14 件)

(1) Y. Zhang, Y. Watanabe, S. Hosono, N. Nagai, and K. Hirakawa: “Uncooled, very sensitive bolometer using a doubly clamped microelectromechanical beam resonator for terahertz detection”, 2016 Workshop on Innovative Nanoscale Devices and Systems (WINDS), Hapuna Beach Prince Hotel, Kohala Coast, Hawaii, USA, Dec. 4-9 (2016).

(2) K. Hirakawa (招待講演): “Room temperature, very sensitive bolometer using doubly clamped microelectromechanical resonators”, 5th Russia-Japan-USA-Europe Symposium on Fundamental & Applied Problems of Terahertz Devices & Technologies (RJUSE TeraTech-2016), Katahira Campus, Tohoku University, Sendai, Japan, Oct. 31-Nov. 4 (2016).

(3) K. Hirakawa (招待講演): “Uncooled, sensitive terahertz bolometer using doubly clamped MEMS beam resonators”, The Seventh International Symposium on Terahertz Nanoscience (TeraNano VII), Porquerolles, France, Oct. 2-8 (2016).

(4) Y. Zhang, Y. Watanabe, S. Hosono, N. Nagai, and K. Hirakawa: “Room temperature, very sensitive bolometer using a doubly clamped microelectromechanical resonator”, 41st International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves (IRMMW-THz 2016), Copenhagen, Denmark, Sep 25-30 (2016).

(5) Y. Zhang, Y. Watanabe, S. Hosono, N. Nagai, and K. Hirakawa: “Room temperature, very sensitive bolometer using a doubly clamped microelectromechanical resonator”, the 43rd International Symposium on Compound Semiconductors (ISCS2016), Toyama International Conference Center, Toyama, Japan, Jun. 26-30 (2016).

(6) 平川一彦: “MEMS 技術によりテラヘルツ電磁波検出が大きく変わる!”, JST 産学共創基礎基盤研究プログラム(テラヘルツ)新技術説明会、JST 東京本部別館、千代田区、東京、3月23日(2017)。

(7) 細野優, 張亜, 長井奈緒美, 平川一彦: “大振幅非線形振動領域におけるテラヘルツ検出用 GaAs MEMS 両持ち梁構造ボロメータの信号検出”, 第 64 回応用物理学会春季学術講演会、パシフィコ横浜、横浜市、神奈川県、3月14日~3月17日、(2017)。

(8) 平川一彦 (招待講演): “半導体量子構

造・マイクロ構造を用いたテラヘルツ電磁波検出の進展”（一財）防衛技術協会 光波・ミリ波センシング研究部会 第9回報告会、文京区、東京、11月22日（2016）。

(9) 張亜、渡辺康行、細野優、長井奈緒美、平川一彦（招待講演）：“テラヘルツセンシング用非冷却・高感度MEMSボロメータの開発”、2016年電子情報通信学会ソサイエティ大会、北海道大学、札幌市、北海道、9月20日～9月23日（2016）。

(10) Y. Zhang, S. Hosono, N. Nagai, and K. Hirakawa: “Enhanced thermal sensitivity of a microelectromechanical bolometer by introducing preloaded strain in the beam structure”, 第77回応用物理学会秋季学術講演会、朱鷺メッセ：新潟コンベンションセンター、新潟市、新潟県、9月13日～9月16日（2016）。

(11) 細野優、張亜、J. Maire、長井奈緒美、肥後昭男、中野義昭、野村政宏、平川一彦：“TDTR法を用いたテラヘルツ検出用GaAs MEMS両持ち梁構造の熱時定数の評価”、第77回応用物理学会秋季学術講演会、朱鷺メッセ：新潟コンベンションセンター、新潟市、新潟県、9月13日～9月16日（2016）。

(12) Y. Zhang, Y. Watanabe, S. Hosono, N. Nagai, and K. Hirakawa: “Room temperature, very sensitive bolometer using a doubly clamped microelectromechanical resonator”、応用物理学会テラヘルツ電磁波技術研究会、東京大学生産技術研究所、目黒区、東京、6月16日（2016）。

(13) 細野優、張亜、J. Maire、長井奈緒美、肥後昭男、中野義昭、野村政宏、平川一彦：“TDTR法を用いたテラヘルツ検出用GaAs MEMS両持ち梁構造の評価”、第63回応用物理学会春季学術講演会、東京工業大学大岡山キャンパス、目黒区、東京、3月19日～3月22日（2016）。

(14) Y. Zhang, Y. Watanabe, S. Hosono, N. Nagai and K. Hirakawa: “Room temperature, very sensitive terahertz bolometer using doubly clamped mechanical oscillators”, 第63回応用物理学会春季学術講演会、東京工業大学大岡山キャンパス、目黒区、東京、3月19日～3月22日（2016）。

〔図書〕(計 件)

なし

〔産業財産権〕

出願状況(計1件)

名称：「テラヘルツ波検出装置」

発明者：平川一彦、張 亜、細野 優、渡辺康行

権利者：国立大学法人 東京大学

種類：特許

番号：特願 2017-39460

出願年月日：平成29年3月2日

国内外の別：国内

取得状況(計0件)

なし

〔その他〕

ホームページ等

<http://thz.iis.u-tokyo.ac.jp>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

平川 一彦 (HIRAKAWA, Kazuhiko)

東京大学・生産技術研究所・教授

研究者番号：10183097

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

野村 政宏 (NOMURA, Masahiro)

東京大学・生産技術研究所・准教授

研究者番号：10466857

吉田 健治 (YOSHIDA, Kenji)

東京大学・生産技術研究所・助教

研究者番号：50738599

(4) 研究協力者

張 亜 (ZHANG, Ya)

東京大学・生産技術研究所・特任助教