

平成 30 年 6 月 18 日現在

機関番号：13801

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H03990

研究課題名(和文) 微細メアンダ構造を用いた高感度アンテナ結合テラヘルツボロメータの研究

研究課題名(英文) Study on the High-Detectivity THz Antenna-Coupled Bolometer with Meander Structures

研究代表者

廣本 宣久 (HIROMOTO, NORIHISA)

静岡大学・創造科学技術大学院・教授

研究者番号：60359073

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,500,000円

研究成果の概要(和文)：テラヘルツ(THz)による産業、医療、社会の安全などの分野の非破壊計測応用に極めて重要な、1THzより低い周波数帯での高検出能の常温THz検出器技術を実現するため、サーミスタの高抵抗化による高感度化を目的として、メアンダ構造の金属線サーミスタを用いるTHzアンテナ結合ボロメータの研究開発を行い、従来よりも良いNEP(雑音等価電力)を実現した。この結果は、現在の常温THz検出器において最高レベルの性能である。THzの光学感度は、電気感度の実験結果およびアンテナの電磁界シミュレーションの計算結果とほぼ一致し、アンテナ受信の効果を明確に示している。

研究成果の概要(英文)：Development of room-temperature terahertz (THz) detectors with high detectivity is especially important in wide fields of applications to industry, medicine, security and so on. We have studied antenna-coupled THz microbolometers with meander metal-lines of thermistors for this purpose. The noise-equivalent power (NEP) of the antenna-coupled microbolometer with a meander thermistor of titanium (Ti) is measured by using a 1 THz radiation source, which is much improved to the performance of the world class. The THz responsivity is consistent with the result of electric measurement and also electromagnetic simulation, showing the effectiveness of the receiving antenna.

研究分野：テラヘルツ・赤外線工学

キーワード：テラヘルツ/赤外材料・素子 電子デバイス・素子 電子・電気材料 マイクロ・ナノデバイス

1. 研究開始当初の背景

(1) テラヘルツ (THz) 帯でのセンシング応用において、THz 帯の特長である物質の透過性と物質識別のための指紋スペクトルの存在が両立する可能性のある 1 THz あたりの周波数帯の THz 波の利用が最も重要と考えられる。

(2) しかし、THz 領域は、検出器においても、光・赤外、電波に比べて性能が低く、いわゆるテラヘルツギャップが存在し、常温の検出器は検出能が低く、高検出能の検出器は極低温で冷却した Si ボロメータ等の THz 検出器か、ショットキバリアダイオード等によるヘテロダイン検出器に限られ、実用的な目的に容易に応用することが困難である。

(3) これまで研究された常温の THz 検出器およびアレイは、物質の温度抵抗変化を用いる赤外マイクロボロメータ、焦電効果の温度変化を用いるパイロ検出器、チャネルの電荷の密度振動と整流作用にもとづく CMOS 検出器、強電界電離に関する Keldish 理論の効果による可視 CCD などが試みられているが、常温の物体の検出、撮像には検出能が低く、THz レーザのビームプロファイルに用いられるレベルである。

(4) そのため、我々の研究グループは、Si 基板上的新しい構造のアンテナ結合テラヘルツボロメータを提案し、科学技術振興機構 (JST) の支援により、1THz 帯高検出能常温検出器技術の研究を行った。この研究では、電子線 (EB) リソグラフィのプロセスにより THz アンテナ結合ボロメータを試作し、1THz 光源を用いて THz 波をアンテナで受信して検出できることを実証、アンテナへの THz 照射面積を Si 表面の THz 波長の平方に取り、感度 90 V/W 、雑音等価電力 (NEP) $4.6 \times 10^{-10} \text{ W/Hz}^{1/2}$ 、カットオフ応答周波数 7 kHz の性能を報告した。

(5) この性能は、現在市販の常温 THz 検出器と比較して、NEP が同レベルで、応答速度は 100 倍程度速く、優れている。しかし、製作技術の限界からサーミスタの Ti 細線の抵抗温度係数 (TCR) が、バルク Ti の約 10 分の 1 になったため、世界最高性能を示すことができなかった。

2. 研究の目的

(1) テラヘルツ (THz) 波の応用が期待されるセキュリティ、産業、医療・健康分野での非破壊検査、非侵襲計測装置を開発する基盤となる常温動作の THz 検出器の性能を向上させることが、本研究の目的である。

(2) その目的のため、本研究では、上記の研究成果をもとに、最適な抵抗値のサーミスタとヒータを実現するため、微細なメアング

造を持つボロメータを提案した。抵抗温度変化が大きく低雑音のサーミスタ細線とアンテナにインピーダンスマッチングしたヒータを研究開発することにより、常温 THz 検出器の感度、NEP、応答速度において世界最高レベルを実証することが、本研究の目標である。

3. 研究の方法

(1) Si 基板上的半波長ダイポールアンテナを用いるアンテナ結合マイクロボロメータの電磁界および熱伝導シミュレーションによって、従来よりも高感度を実現するための、最適なサーミスタおよびヒータの抵抗値について解析し、検討を行った。

サーミスタ、ヒータの材料は、これまで研究開発に用いてきた Ti に加え、金属薄膜の温度計として一般に用いられ、安定した性能が期待される Pt も採用した。Pt は、温度抵抗係数が Ti とほぼ同じで、電気抵抗率が $1/4$ で小さいが、熱伝導率が 3.5 倍大きく、サーミスタ材料として、多少有利になる可能性がある。

(2) Ti と Pt を用いた場合のサーミスタとヒータの設計値を示す。

表 1. Ti, Pt を用いたヒータ、サーミスタ細線のサイズの設計値

材料		Ti	Ti	Pt	Pt
抵抗率	[m]	4.27E-07	4.27E-07	1.05E-07	1.05E-07
TCR	[%/K]	3.00E-01	3.00E-01	3.00E-01	3.00E-01
熱伝導率	kt [W/(mK)]	21.9	21.9	71.6	71.6
厚み	t [m]	5.0E-08	5.0E-08	5.0E-08	5.0E-08
幅	W [m]	2.3E-06	1.0E-07	5.7E-07	1.0E-07
長さ	L [m]	1.1E-05	6.0E-05	1.1E-05	2.2E-04
抵抗	R []	40.8	5120.0	40.5	4620.0
熱伝導	Kt [W/K]	2.29E-07	1.83E-09	1.86E-07	1.63E-09
素子		ヒータ	サーミスタ	ヒータ	サーミスタ

この設計値をもとに 1THz 帯メアング細線テラヘルツアンテナ結合マイクロボロメータの構造設計を行った (図 1)。検出器の構造は、全長 $52 \mu\text{m}$ の半波長ダイポールアンテナ、中央に Ti ヒータ ($11 \mu\text{m}$ 長、 $2.12 \mu\text{m}$ 幅) と電気絶縁したサーミスタを配置している。サーミスタは、従来の Ti および Pt 材料により、

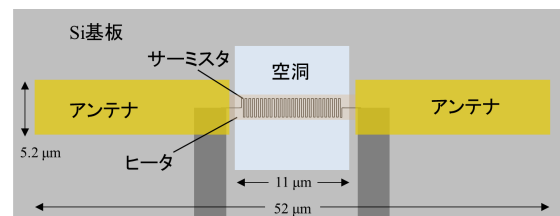


図 1 .1THz 帯メアング細線アンテナ結合マイクロボロメータの構造 .

$49 \mu\text{m}$ 長、 $0.2 \mu\text{m}$ 幅および $89 \mu\text{m}$ 長、 $0.1 \mu\text{m}$ 幅のメアング細線の構造である。

(3) これまで試作した Ti 膜は、バルクの値に比べ、抵抗率が大きく、TCR が低くなっており、更に Ti 膜の抵抗率と TCR が逆比例の

関係を持ち、また、作製した細線では線幅が細くなるほど、抵抗率が大きく、TCR が低くなっている。これらは、Ti 膜中で表面散乱や粒界散乱などの温度依存性の小さいキャリア散乱機構の寄与が増大し、それにより電気抵抗が支配されるためと推測される。従って、Ti 細線の抵抗値がバルクに近くなるように製法を改良すると、同時に TCR も大きくなることが期待できる。そのため、製膜前の残留ガス圧の低減、Ti 膜の結晶粒を大きくするよう結晶配向・表面状態の改善、電子ビーム (EB) リソグラフィによるライン・エッジ・ラフネスの低減の研究を行った。

(4) 製作したマイクロボロメータの性能評価のため、ヒータへの変調電力入力に対するサーミスタの出力電圧を計測する電氣的感度の測定、および変調なしでの出力雑音の測定を行い、電氣的性能を評価した。

さらに、ショットキーダイオード通倍器 (3 段-72 通倍) による 1 THz 光源を用い、メアング構造アンテナ結合マイクロボロメータの光学感度およびその THz 周波数スペクトル入射する THz 光の変調 (チョッピング) 周波数に対する依存性、アンテナによる THz 検出を確認するための偏光方向・偏光度、室温背景放射下での精密な雑音測定を行い、光学性能の評価を行った。

4. 研究成果

(1) Si 基板上 SiO₂ 膜の上に、電子ビーム蒸着により積層した Ti 薄膜から、EB リソグラフィを用いて製作した Ti 細線の抵抗率および TCR の線幅に対する依存性を、図 2 に示す。これまでの試作と比べ、製作プロセスの改善により、線幅を小さくした条件でも、抵抗率が小さくなり、TCR でも 2 倍以上の増加が実現できている。

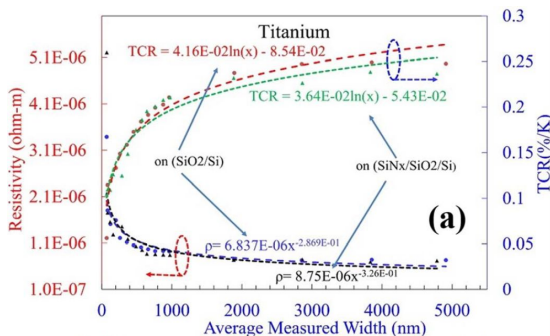


図 2 Ti 細線の抵抗率と TCR の線幅に対する依存性。

(2) また、Ti 薄膜面を、電子線後方散乱回折法 (EBSD) による計測結果から求められたグレインサイズは、約 35 nm であったが、150 μm 平方の面から、1000 nm、300 nm、100 nm の細線への線幅の減少に伴い、グレインサイズが、39.2 nm から 31.9 nm に小さくなるという依存性が得られた。このことは、Ti 細線

の線幅に依存して、抵抗率が増え、TCR が減る理由の 1 つが、細線を形成するための EB リソグラフィプロセスにおける、Ti 細線の結晶性の変化によることを示唆するものである。

(3) 新規に製作を行った Pt 細線の抵抗率および TCR の線幅に対する依存性を、図 3 に示す。Pt 線も、Ti 線と同様に抵抗率および TCR の線幅依存性が大きいことが分かった。Ti 細線の場合に比べると、Pt 細線の抵抗率の値のバルク値との比は 2 倍程度で、小さいと言えるが、Pt 細線の TCR の値は、Ti 細線と同程度にとどまっている。

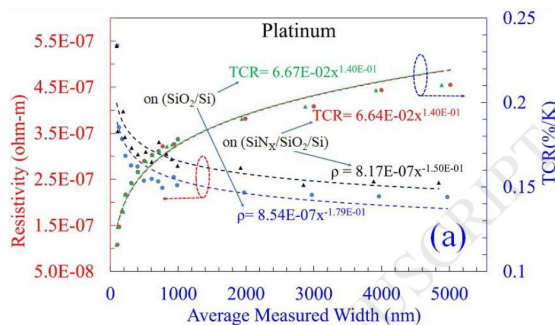


図 3 Pt 細線の抵抗率と TCR の線幅に対する依存性。

(4) 1THz 光源を用いた光学性能評価実験により、89 μm 長、0.1 μm 幅の Ti メアング細線サーミスタの THz アンテナ結合マイクロボロメータにおいて、アンテナへの入射 THz 強度を Si 基板表面の波長 (119 μm) の平方にとると、バイアス電流 0.1mA、チョッピング周波数 330 Hz において、感度 302 V/W、雑音 55 nV/ Hz、NEP 1.8E⁻¹⁰ W/ Hz が得られた。応答速度は、ヒータ抵抗から従来と同じく 7 kHz 程度と思量される。メアング細線サーミスタで実証された NEP は、従来の 11 μm 長、0.1 μm 幅の直線サーミスタに比べ、約 1/3 の良い NEP が得られ、この結果は、現在の常温 THz 検出器において最高レベルの性能を示している。

(5) THz 感度の偏光依存性の測定では、THz 感度入射 THz 光の電界方向がアンテナ軸方向に平行の時に最大、直交する時に最少の THz 感度を得られたことから、THz 光がアンテナで受信されていることは確実である。得られた感度は、電磁界および熱伝導シミュレーションで得られた結果とほぼ一致しており、我々の実験とシミュレーションが信頼できるものであることを示している。

(6) また、49 μm 長、0.2 μm 幅の Ti メアング細線サーミスタの THz アンテナ結合マイクロボロメータにおいて、光学性能評価実験で得られた 76 V/W の感度は、電氣的感度の測定結果の 286 V/W と比べ、電磁界シミュレーションで求められた THz 帯の実効面積を考慮

すると、ほぼ一致しており、研究結果の信頼性は高いといえる。

(7) Pt メアング細線サーミスタを用いる THz アンテナ結合マイクロボロメータの光学性能評価実験の結果は、光学的感度が、Ti サーミスタのマイクロボロメータに比べ、1/30 以下であったため、良い NEP が得られなかった。その理由の一部は、Pt サーミスタの抵抗が小さく、熱伝導が大きいことによると考えられる。

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 3 件)

A. Banerjee, 佐藤 弘明, Y. Sharma, 廣本 宣久, 猪川 洋, Characterization of platinum and titanium thermistors for terahertz antenna-coupled bolometer applications, Sensors and Actuators A: Physical, Vol.273, 2018, pp.49-57, 査読有, DOI:10.1016/j.sna.2018.02.014

A. Banerjee, 佐藤 弘明, D. Elamaran, Y. Sharma, 廣本 宣久, 猪川 洋, Optimization of narrow width effect on titanium thermistor in uncooled antenna-coupled terahertz microbolometer, Jpn. J. Appl. Phys. Vol.57, 2018, pp. 04FC09_1-7, 査読有, DOI: 10.7567/JJAP.57.04FC09

A. Banerjee, 佐藤 弘明, A.Tiwari, C. Apriono, E. T. Rahardjo, 廣本 宣久, 猪川 洋, Width dependence of platinum and titanium thermistor characteristics for application in room-temperature antenna-coupled terahertz microbolometer, Jpn. J. Appl. Phys. Vol.56, 2017, pp. 04CC07_1-5, 査読有, DOI: 10.7567/JJAP.56.0CC07

[学会発表](計 20 件)

A. Banerjee, 佐藤 弘明, Y. Sharma, A.Tiwari, 廣本 宣久, 猪川 洋, Optimization of Narrow Width Effect on Titanium Thermistor in Uncooled Antenna-Coupled Terahertz Microbolometer, International Conference on Solid-State Devices and Materials (SSDM 2017), 2017

A. Banerjee, 佐藤 弘明, Y. Sharma, A.Tiwari, 廣本 宣久, 猪川 洋, Optimization of Platinum and Titanium Thermistor in Uncooled Antenna-Coupled Terahertz Microbolometer Fabrication, International Conference organized by Department of Physics and Nanotechnology (ICONN 2017), 2017

D. Elamaran, A. Banerjee, 佐藤 弘明, 廣本 宣久, 猪川 洋, Study on NEP for optimization of THz Antenna-Coupled Ti Microbolometers with Straight and Meander Shaped Thermistors, 第 65 回応用物理学会春季学術講演会, 2017

廣本 宣久, A. Banerjee, 佐藤 弘明, 猪川 洋, 青木 誠, E. Bruendermann, 微細メアング線サーミスタを用いるテラヘルツアンテナ結合マイクロボロメータの研究開発, 日本赤外線学会第 27 回研究発表会, 2017

廣本 宣久, A. Banerjee, 青木 誠, 佐藤 弘明, 猪川 洋, 微細メアング構造テラヘルツアンテナ結合マイクロボロメータの研究, 第 78 回応用物理学会秋季学術講演会, 2017

6. 研究組織

(1) 研究代表者

廣本 宣久 (HIROMOTO, Norihisa)
静岡大学・創造科学技術大学院・教授
研究者番号: 60359073

(2) 研究分担者

佐藤 弘明 (SATO, Hiroaki)
静岡大学・電子工学研究所・助教
研究者番号: 00380113

青木 誠 (AOKI, Makoto)
国立研究開発法人情報通信研究機構・電磁波研究所リモートセンシング研究室・研究員
研究者番号: 40744652

猪川 洋 (INOKAWA, Hiroshi)
静岡大学・電子工学研究所・教授
研究員番号: 50393757

(3) 連携研究者

()

研究者番号:

(4) 研究協力者

Erik Bruendermann (BRUENDERMANN, Erik)
独国カールスルーエ工科大学・シンクロトロン放射光研究所・研究科長

Amit Banerjee (BANERJEE, Amit)
静岡大学・電子工学研究所・非常勤研究員

Tripathi Saroj Raman (SAROJ RAMAN, Tripathi)
静岡大学・工学部・准教授