

ナノアンテナ結合型中赤外ホットエレクトロンボロメータミキサの検討

川上 彰¹, 島影 尚², 堀川隼世³, 兵頭政春⁴, 齋藤伸吾¹, 田中秀吉¹, 鵜澤佳徳¹

¹情報通信研究機構 (〒651-2492 神戸市西区岩岡町岩岡 588-2)

²茨城大学大学院 (〒316-8511 茨城県日立市中成沢町 4-12-1)

³福井工業高等専門学校 (〒916-8507 福井県鯖江市下司町)

⁴金沢大学 理工学域 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)

Study of Mid Infrared Superconducting Hot Electron Bolometer Mixers with nano-antennas

Akira KAWAKAMI¹, Hisashi SHIMAKAGE², Junsei HORIKAWA³, Masaharu HYODO⁴, Shingo SAITO¹, Shukichi TANAKA¹, and Yoshinori UZAWA¹

¹ National Institute of Information and Communications Technology, Kobe, Hyogo 651-2492, Japan

² Graduate School of Science and Engineering, Ibaraki University, Hitachi, Ibaraki 316-8511, Japan

³ National Institute of technology, Fukui College, Sabae, Fukui 916-8507, Japan

⁴ Faculty of Mechanical Engineering, Kanazawa University, Ishikawa 920-1192, Japan

Abstract: To improve the response performance of mid-infrared (MIR) detectors, we designed and fabricated a superconducting hot electron bolometer mixer (HEBM) with a MIR twin slot antenna. For designing MIR antennas and circuits, the surface impedance of Au thin films at cryogenic temperatures was evaluated. The HEBMs were formed with a superconducting strip, Au antenna, and distributed circuits, and the design frequency was set at 61.3 THz. We confirmed that the HEBM show responses with clear polarization dependence under MIR light irradiation. When the bias current was set near the critical current, dark pulses were observed under MIR irradiation, and the full width at half maximum of the dark pulse was evaluated to be approximately 0.21 ns. From these results, we considered that the MIR HEBM have 0.9 GHz IF-bandwidth.

Key Words: HEBM, Infrared, NbN, antenna

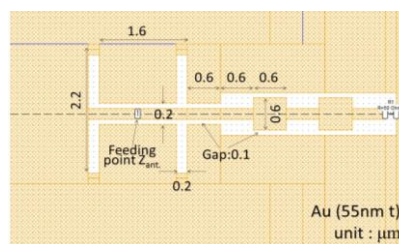
1. はじめに

従来、中赤外(Mid-infrared : MIR)領域における光検出器は、入射光子をいかに効率よく収集する、いわゆる光の粒子性に基いた素子設計が成されてきた。しかし近赤外領域に比べ MIR 領域では光子エネルギーが小さく、かつ適切な半導体材料の不足から、更なる高速化・高感度化を両立した MIR 検出器の実現は困難と考えている。一方で遠赤外に相当する THz 帯では超伝導ホットエレクトロンボロメータミキサ(HEBM)など電磁波をアンテナで受信し、その給電点に整合した微小検出器を配置することで、高速・高感度検出器を実現している。そこでナノ微細加工技術を駆使し、MIR 領域においてもアンテナなど波動性を活かしたデバイス設計が可能となれば、高速性・高感度特性を両立できると考えた。近年、光の波動性を活かしたデバイス設計が幾つか提案され、また我々も MIR アンテナ、マイクロストリップ線路の評価を報告してきた¹⁻⁴。本報告では同領域における HEBM を試作、MIR アンテナの動作確認及び MIR 検出器としての応答特性評価を行い、そのミキサとしての可能性を報告する。

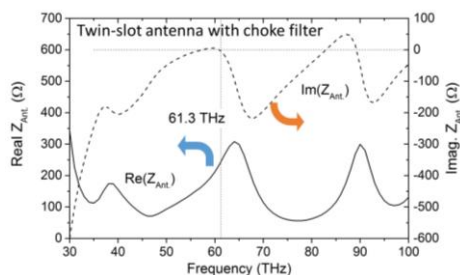
2. MIR-HEBM の設計と作製

MIR 領域において金属薄膜による回路設計を行うためには、異常表皮効果を考慮した複素表面インピーダンスをシミュレータに導入する必要がある。まず、アンテナを構成する金(Au)薄膜の複素屈折率をエリプソメータ(IR-VASE : J.A.

Woolam 社)を用いて測定し、測定結果と直流抵抗率から、室温における MIR 領域での Au の複素表面インピーダンスを導出した。しかし超伝導検出器が動作する極低温下では、金属電子の平均自由行程が増大することで、異常表皮効果に影響を与え、複素表面インピーダンスが変化すると考えられる。そこで長さ 1.3 μm 、幅 0.2 μm 、膜厚 55 nm の矩形型 Au 薄膜 MIR 共振器を作製、試料冷却が可能なフーリエ変換分光光度計を用いて共振周波

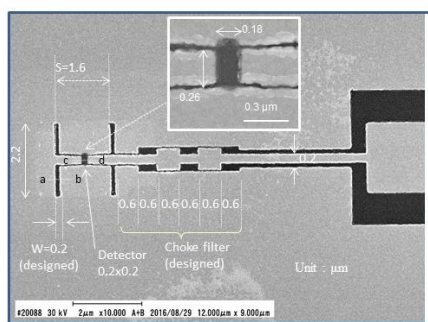


(a) Design of the twin-slot nano-antenna

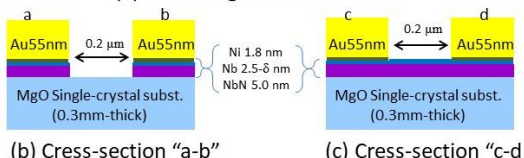


(b) Simulated impedance $Z_{Ant.}$ of the twin-slot nano-antenna

Fig. 1 Design of mid-infrared antenna and the calculation of the antenna impedance $Z_{Ant.}$.



(a) SEM image of MIR-HEBM



(b) Cross-section "a-b"

(c) Cross-section "c-d"

Fig. 2 (a) SEM image of the MIR HEBM, (b) and (c) the schematics of the cross section of the HEBM.

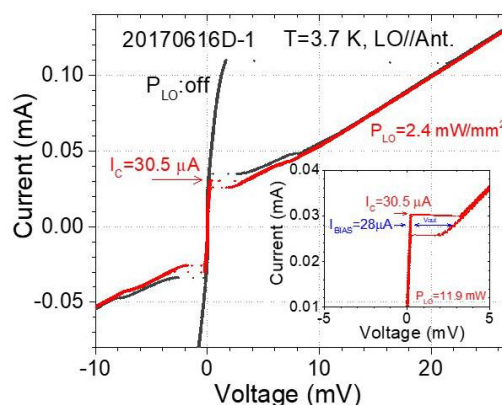
数の温度依存性を評価し、設計周波数である 61 THz 付近での Au 複素表面インピーダンスの補正を行っている⁵⁾。また、基板材料に想定している酸化マグネシウム(MgO)は屈折率報告値($n=1.624$ @ $\lambda=5.35 \mu\text{m}$)⁶⁾を使用している。アンテナ等分布定数回路の設計には電磁界シミュレータ SONNET を用いた。

図 1 に中赤外光アンテナの設計寸法とアンテナインピーダンス Z_{Ant} の計算結果を示す。設計周波数は光源波長に合わせて 61.3 THz、今回、比較的高いアンテナインピーダンスが得られるツインスロットアンテナ構造を採用、シミュレーション結果を基にアンテナ長および幅を各々 2200, 200 nm とした。チョークフィルタを含めた設計周波数におけるアンテナインピーダンスは $Z_{\text{Ant}}=250-j6 \Omega$ と見積もられた。

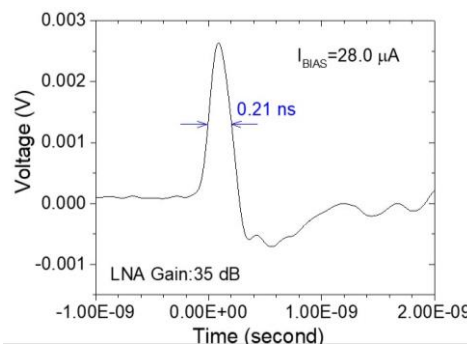
MIR 領域で動作するアンテナ構造構築のため、全てのリソグラフィ工程に電子線描画を用いた MIR-HEBM 作製プロセスを検討した^{3,4)}。図 2(a) に作製した MIR-HEBM の SEM 画像を、また挿入図はアンテナ給電点付近の拡大図を示す。HEBM は Au 薄膜(膜厚 55nm)による薄膜アンテナと、その給電点に配置した超伝導極薄膜ストリップから構成されている。今回、アンテナとのインピーダンス整合の為、超伝導極薄膜としてニオブ(Nb: 膜厚約 1.5 nm)/窒化ニオブ(NbN: 膜厚 5 nm)二層膜(超伝導転移温度: 約 11 K)を用いた。SEM 観測から同ストリップの長さおよび幅は各約 0.18, 0.26 μm であった。図 2(b)及び(c)は図(a)中"a-b", "c-d"間の断面概略図を示す。ここで Au 薄膜と超伝導ストリップ間には Nb/NbN 極薄膜の超伝導性抑圧のため、ニッケル(Ni)薄膜(膜厚 1.8 nm)を配置している。

3. MIR-HEBM の光応答特性評価

今回、MIR-HEBM の応答特性評価のため、冷却には 1W-GM 冷凍機を用い、また MIR-CW 光源として波長 4.89 μm の中赤外量子カスケードレーザを用いた。図 3 に測定温度 3.7 K における HEBM の I-V 特性を示す。ここで黒線は MIR レーザ未照



(a) I-V characteristics of the HEBM with and without MIR-light irradiation



(b) Output dark-pulse waveform

Fig. 3 Output waveform of the HEBM under MIR-light irradiation.

射時、赤線は照射時(2.4 mW/mm²)である。図から HEBM の素子抵抗はアンテナインピーダンスに近い約 200 Ω であった。MIR レーザ照射において、偏波方向がアンテナと一致した場合のみ、超伝導臨界電流(I_c)の明らかな減少が観察された。

MIR レーザ照射により HEBM の I_c を 30.5 μA に減少させ、 I_c 近く ($I_{\text{BIAS}}=28 \mu\text{A}$) に直流電流バイアスを印加した場合、MIR レーザの揺らぎ等に起因するダークパルス出力が観測された。同波形は HEBM の緩和時間に依存するものと考えられ、パルス幅からミキサ動作時の中間周波数(IF)帯域評価を試みた。同パルス出力の 4096 回平均波形を図 3(b)に示す。半値全幅として約 0.21 ns が得られた。測定系帯域幅を考慮すると共に、HEBM の IF 帯域幅を一次の遮断特性を持つローパスフィルタで代表させることでミキサ動作時の IF 帯域幅を見積もったところ、約 0.9 GHz が得られた。

参考文献

- 1) Y. Lobanov, *et al.*, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 25, p. 2300704, (2015).
- 2) Y. Yao, *et al.*, *Nano Lett.* 14(7), pp 3749-3754, (2014).
- 3) A. Kawakami, *et al.*, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 17, pp. 632-635, (2011).
- 4) A. Kawakami, *et al.*, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 25, p. 2300904, (2015).
- 5) A. Kawakami, *et al.*, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 27, p. 2300105, (2017).
- 6) R. E. Stephens and I. H. Malitson, *J. Res. Natl. Bur. Stand.* 49 pp. 249-252, (1952).