

## 2-3 中赤外超伝導ホットエレクトロンボロメータミキサの研究

### 2-3 Study on Mid Infrared Superconducting Hot Electron Bolometer Mixer

川上 彰 堀川隼世 島影 尚 田中秀吉 鶴澤佳徳

KAWAKAMI Akira, HORIKAWA Junsei, SHIMAKAGE Hisashi, TANAKA Shukichi, and UZAWA Yoshinori

中赤外領域における地球環境計測、情報通信、セキュリティ応用などを旨として、ナノアンテナを用いた中赤外超伝導ホットエレクトロンボロメータミキサ (MIR-HEBM) の開発を行っている。中赤外アンテナ・分布定数回路の設計精度を高めるため、フーリエ分光光度計を用いて、中赤外領域での極低温下における金薄膜の複素表面インピーダンスを評価した。得られた結果を電磁界シミュレータに導入し、中赤外ツインスロットアンテナを備えた MIR-HEBM を設計した。試作した MIR-HEBM に、適切な強度の中赤外光を照射することで、電圧状態にラッチすることなく電圧パルスを観測することができ、このパルスの半値全幅から、ミキサ中間周波数 (IF) 帯域幅は約 0.9 GHz と見積もられた。またビームスプリッタを使用しない MIR-HEBM 雑音温度評価系を構築し、信号源温度の差による IF 出力の変化を観測した結果、61.3 THz における受信機雑音温度として約 17,000 K (DSB) を得た。

We have been developing a mid-infrared superconducting hot electron bolometer mixer (MIR-HEBM) using nano-antennas for global environment measurement, information and communication technology, security application etc. in the mid-infrared region. The complex surface impedance of gold thin film at cryogenic temperatures was evaluated using Fourier transform infrared spectroscopy to improve the design accuracy of MIR-HEBM. By introducing the obtained physical parameters of gold thin film into the electromagnetic wave simulator, we have designed the MIR-HEBMs with a twin-slot antenna. By irradiating a MIR light with an appropriate intensity to the fabricated MIR-HEBM, voltage pulses were observed without latching into the voltage state. The intermediate frequency (IF) bandwidth was estimated to be about 0.9 GHz from the full width at half maximum of the observed pulse waveform. For evaluating the mixer noise temperature, a measurement setup without a beam splitter was constructed. The change in the IF output due to the difference in signal source temperature was observed, and the noise temperature of about 17,000 K (DSB) was obtained at 61.3 THz.

#### 1 まえがき

超伝導ホットエレクトロンボロメータミキサ (HEBM) は、二つの近接した二つの金属電極を極薄 (膜厚数 nm) の超伝導ストリップで接続した構造で、超伝導ストリップの臨界温度 ( $T_c$ ) 付近での大きな抵抗変化を利用したボロメータである。2 テラヘルツ (THz) を超える周波数領域における極低雑音ミキサ素子として、広く研究開発が進められている [1][2]。NICT においても、テラヘルツ周波数領域における通信基盤技術の確立や、地球環境計測等リモートセンシング技術などへの応用を目指した研究開発を進めており、NICT が独自提案している磁性体を用いた HEBM 構造 (Ni-HEBM) は、

現在、2 THz 帯において低雑音・広 IF 帯域幅の世界トップレベルの受信機性能を達成している [3]。一方で HEBM の動作上限周波数は、その構造・寸法にのみ制限を受けると考えられ、適切な素子設計と更なる微細化により、数十 THz に相当する中赤外光 (MIR) 領域まで実現可能である。そこで我々は、MIR 領域における基盤技術の獲得を目的として、MIR-HEBM の研究を実施している。

従来の中赤外光検出器の多くは、入射光子をいかに効率よく収集するかという、いわゆる光の粒子性に基づいた素子設計がなされてきた。しかし、本研究では THz 帯 HEBM と同様に、中赤外光を電磁波としてアンテナで受信し、その給電点にインピーダンス整合し

た極微小検出部を配置する、いわゆる電磁波の波動性に基づいた設計思想を中赤外光検出器に適用している。極微小検出部の採用により、寄生容量・インダクタンスの低減による応答性能の向上と、検出部体積の減少による高感度化が期待できる。既に、室温における同領域金薄膜の複素表面インピーダンスを評価し、電磁界シミュレータに導入することで、中赤外光領域でのアンテナ・分布定数回路の設計が可能であることを報告した[4][5]。我々は、極低温下における金薄膜の複素表面インピーダンスの評価を試み、その結果を基にMIR-HEBMを設計、試作した。本稿では、試作したMIR-HEBMのIF帯域幅、61.3 THzにおけるミキサ雑音温度を評価した結果について報告する。

## 2 MIR-HEBM の設計と作製

### 2.1 極低温における中赤外光アンテナ・分布定数回路の設計

中赤外光領域におけるアンテナ・分布定数回路の設計には、異常表皮効果を考慮した金属複素表面インピーダンスを電磁界シミュレータに導入する必要がある。そこでまず、アンテナ等を構成する金(Au)薄膜の複素屈折率をエリプソメータ(IR-VASE: J.A. Woolam社製)を用いて測定し、測定結果と実測した直流抵抗率から、室温における中赤外領域でのAuの複素表面インピーダンスを導出した。しかしMIR-

HEBMが動作する10 K以下の極低温下では、金属電子の平均自由行程が増大し、中赤外光周波数の交番電場に対する電子運動の遅延が顕著となることで、複素表面インピーダンスの虚数成分(表面リアクタンス)の増大が予想される。表面リアクタンスの増大は、アンテナ長や分布定数線路内波長等の短縮につながり、回路設計に影響を与える。そこで室温におけるAu複素表面インピーダンスを基に、極低温下におけるAu表面リアクタンスの評価を試みた。

温度低下に伴う表面リアクタンスの増大は、金属薄膜で中赤外光共振器を作製した場合、共振周波数の低下として観測できると考えた。そこで矩形Au薄膜共振器を作製し、10 Kまでの試料冷却が可能なフーリエ変換分光光度計(FTIR)を用いて、共振周波数の温度依存性の評価を試みた。ここで矩形共振器は、中赤外領域で十分高い透明度を有する酸化マグネシウム(MgO)単結晶基板上に、膜厚55 nmの金薄膜を用いて作製した。ここで計算に必要なMgOの屈折率は、中赤外における報告値( $n = 1.624 @ \lambda = 5.35 \mu\text{m}$ ) [6]を利用している。図1に冷却FTIRを用いた共振周波数の温度依存性評価系を示す。最初に矩形Au薄膜共振器の設計共振周波数を約66 THzに設定。次に、実測した室温における金薄膜の複素表面インピーダンスを導入した電磁界シミュレータ(SONNET)を用いて矩形共振器の長さ及び幅を算出。それらは各1,300 nm、200 nmであった。FTIRでの測定において充分

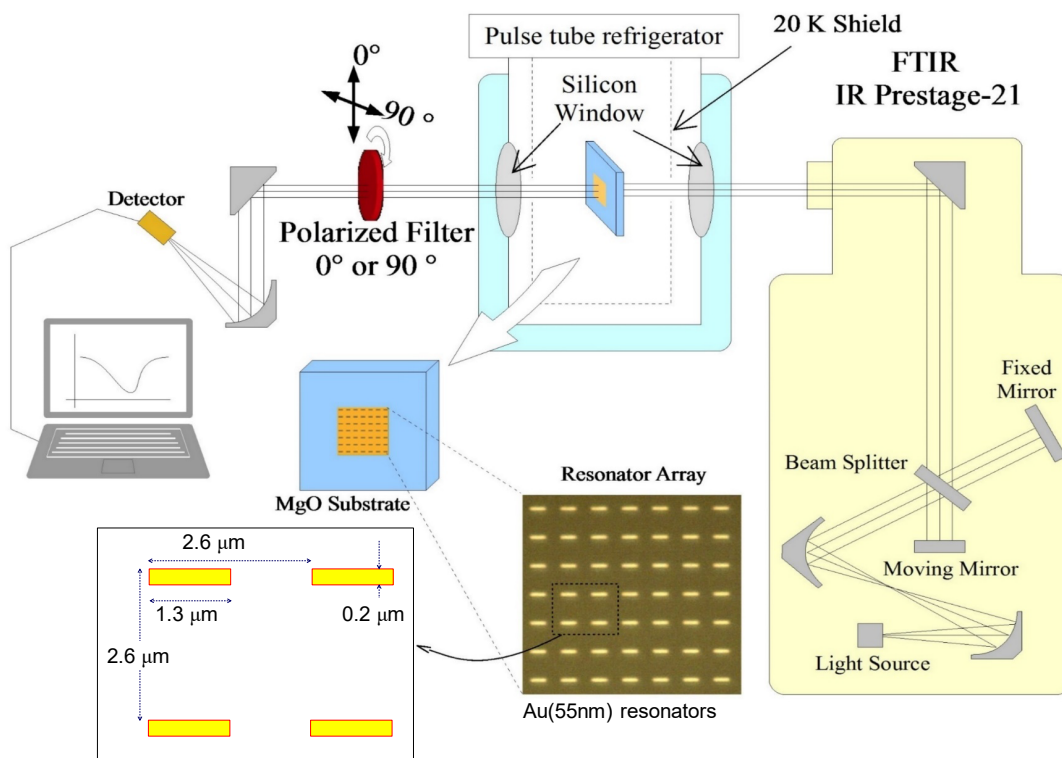


図1 冷却FTIRを用いた共振周波数の温度依存性評価系

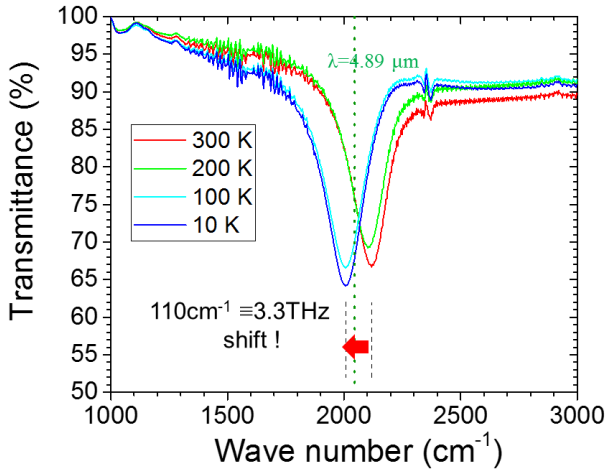
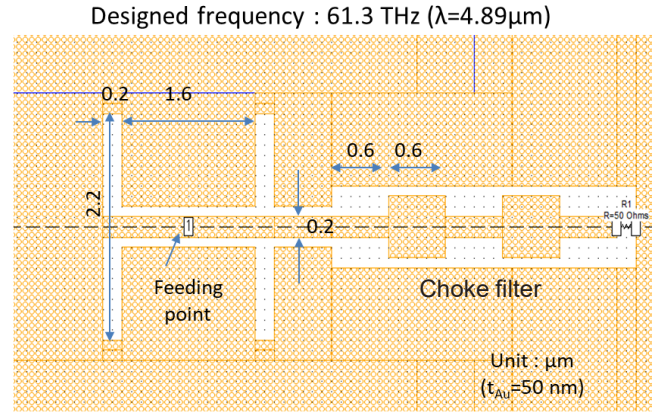


図2 Au 薄膜共振器の共振周波数の温度依存性

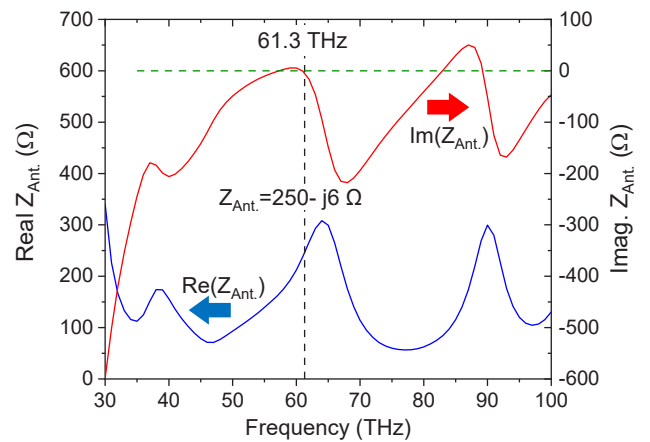
な S/N 比を確保する目的で、この共振器を FTIR 光束より大きい  $2.5 \times 2.5 \text{ mm}^2$  の領域内 X、Y 方向に、相互に干渉しない  $2.6 \mu\text{m}$  間隔で配置した。

矩形 Au 薄膜共振器の各種温度における透過率スペクトルを図 2 に示す。共振周波数は透過率スペクトル上の吸収特性として観測された。室温 (300 K) においては、ほぼ設計共振周波数に一致する波数約  $2120 \text{ cm}^{-1}$  (64 THz) に明確な吸収特性が観測された。室温から 10 K への冷却に伴い、共振周波数は低周波数側にシフトし、特に 200 K から 100 K への温度変化の過程で、大きく変化している。サファイア基板 ( $n = 1.622 @ \lambda = 5.0 \mu\text{m}$ ) [7] を用いた場合でも同様な温度依存性を示すことを確認しており、この温度依存性は、Au 薄膜の表面リアクタンスの増加に起因すると考えている。ただし、その挙動に関する詳細は現在検討中である。室温から 10 K への冷却に伴う共振周波数のシフト量は約 3.3 THz であった。このシフト量をもたらす Au 表面リアクタンスの増加量をシミュレーションと比較して導出した結果、室温の約 1.6 倍であることが分かった。この Au 表面リアクタンスの増加量を考慮した電磁界シミュレーションにより、MIR-HEBM を構成するアンテナ・分布定数回路の設計を行った。

図 3 に中赤外アンテナの設計寸法と計算されたアンテナインピーダンス  $Z_{\text{Ant}}$  の周波数依存性を示す。今回 MIR-HEBM を構成するアンテナとして、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を採用している。設計周波数は 61.3 THz で、シミュレーション結果を基に、アンテナ長及び幅を各々 2,200 nm、200 nm とした。超伝導ストリップは図 3(a) における給電点に配置する。給電点から見た、設計周波数におけるアンテナインピーダンス ( $Z_{\text{Ant}}$ ) は、 $Z_{\text{Ant}} = 250 - j6 \Omega$  と見積もられた。



(a) 中赤外ツインスロットアンテナの設計



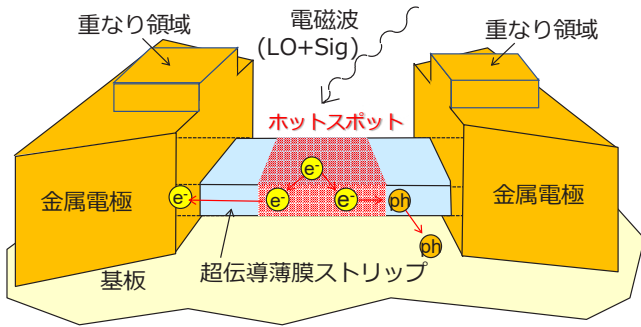
(b) 給電点におけるアンテナインピーダンスの計算値

図3 中赤外ツインスロットアンテナの設計

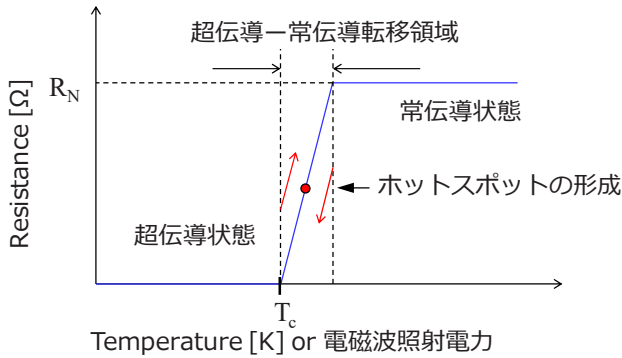
## 2.2 MIR-HEBM の作製

図 4 に HEBM の構造と動作概要を示す。HEBM はアンテナの給電点に相当する位置の電極間に、長さ・幅共に数百 nm で膜厚数 nm の超伝導ストリップを配置した構造をしている (図 4(a))。電磁波を照射した場合、照射電力により超伝導ストリップ内の電子温度が上昇し、超伝導転移温度 ( $T_c$ ) を越えた温度領域を中心に、常伝導領域 (ホットスポット) が形成される (図 4(b))。ここで照射電磁波として、局部発振源 (LO) と共に信号源 (Sig) を照射した場合、その差周波に相当する IF 信号成分のホットスポットサイズの変調が生じ、インピーダンスの変化として IF 出力を獲得できる。

HEBM を構成する超伝導ストリップには、数 nm の極薄で高  $T_c$  の超伝導極薄膜を用いる必要がある。高  $T_c$  は超伝導緩和時間の短縮、極薄膜はフォノン拡散時間の短縮が目的であり、共にヘテロダイナミクスとしての広 IF 帯域幅の実現に寄与する。従来の THz 帯 HEBM 開発においては、MgO 単結晶基板上にエピタキシャル成長した窒化ニオブ (NbN) 極薄膜 (膜厚約



(a) HEB 素子の模式図



(b) 超伝導薄膜ストリップの抵抗-温度特性

図4 HEBMの構造と動作概要

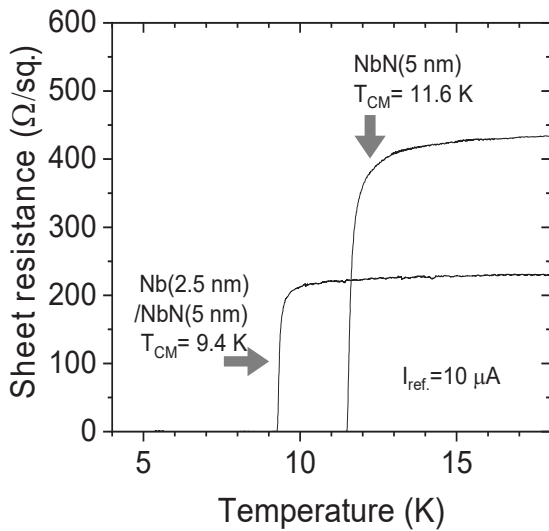


図5 Nb/NbN 二層膜によるシート抵抗の低減

3.5 nm、 $T_c > 10$  K) を使用してきた [8]。しかしながら、3.5 nm という極薄膜では、NbN 薄膜のシート抵抗が大きく、波長  $100 \mu\text{m}$  の 3 THz 帯 HEBM では、ストリップ長  $0.2 \mu\text{m}$  に対して幅  $1 \sim 2 \mu\text{m}$  の幅広形状により、低インピーダンス化 (約  $80 \Omega$ ) できるが、波長数  $\mu\text{m}$  の中赤外領域ではストリップ幅も  $0.2 \mu\text{m}$  程度に設定する必要があり、超伝導ストリップの高抵抗化が避けられない。そこで今回、単体のスロットアンテナに比べ、アンテナインピーダンスを約 2 倍にできるツイン

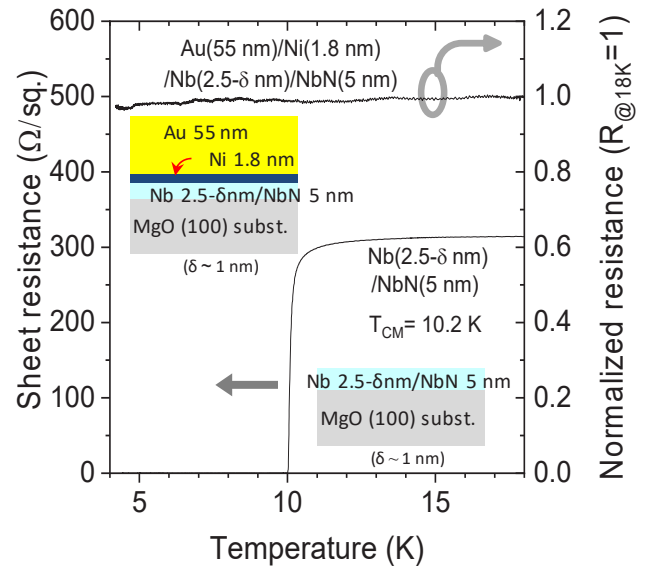
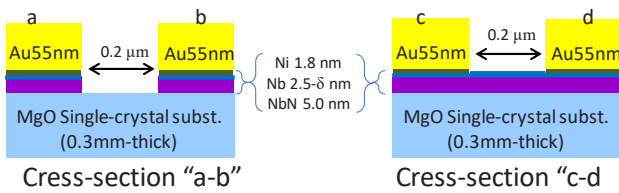
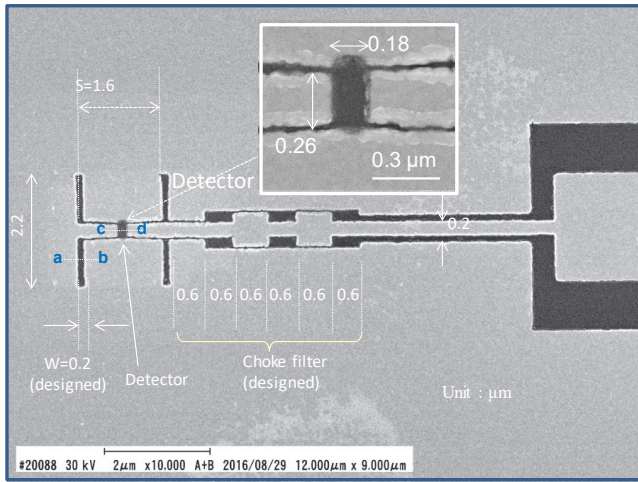


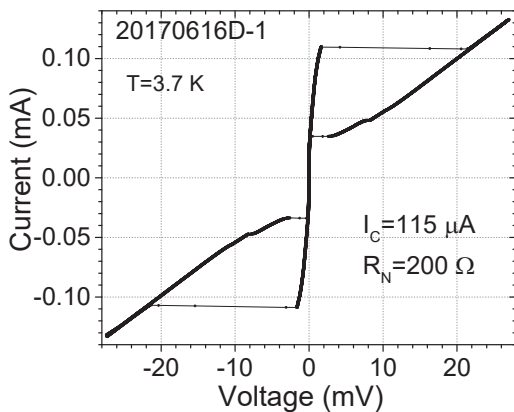
図6 Ni 極薄膜付加による Nb/NbN 超伝導性の抑圧

スロットアンテナを採用するとともに、NbN に比べて抵抗率が一桁小さいニオブ (Nb) を NbN 上に成膜した Nb/NbN 二層膜の採用を検討した。図5に NbN (5 nm) 単層膜及び Nb (2.5 nm) / NbN (5 nm) 二層膜の抵抗-温度特性を示す。ここで Nb/NbN は DC マグネトロンスパッタ法により連続成膜している。成膜プロセスの詳細に関しては参考文献 [9] に記載している。図5から分かるように、常伝導状態である 15 K におけるシート抵抗は、Nb の付加により約  $420 \Omega/\text{sq.}$  から約  $230 \Omega/\text{sq.}$  に減少した。その結果、超伝導ストリップ長さ及び幅を各々  $0.2 \mu\text{m}$  とすることで、アンテナインピーダンス ( $Z_{\text{Ant}} = 250 - j6 \Omega$ ) に整合可能となった。

HEBM は二つの金属電極間を超伝導ストリップで接続する構造であるが、良好な電氣的接続を確保するため、超伝導ストリップ上に電極がオーバーラップした構造を採用している (図4)。MIR-HEBM においても、両 Au 薄膜電極下には超伝導ストリップを形成する Nb/NbN 二層膜が存在する。ここでミキサ動作温度において、金属電極下の Nb/NbN 二層膜も超伝導状態であると予想され、その結果、電極下からの超伝導近接効果が、電極間超伝導ストリップ内でのホットスポット形成を阻害することが危惧される。このことは検出感度の低下や必要な LO 電力の増大などの影響を与えられられる。既に我々は、2 THz 帯 HEBM 研究開発において、電極下の超伝導性を抑制する磁性材料を用いた新たな HEBM 構造を提案している [3]。そこで今回、MIR-HEBM においても、磁性材料による電極下超伝導性の消失を試みた。既に膜厚 5 nm の NbN 単層膜に、磁性材料として膜厚 1.8 nm のニッケル (Ni) 薄膜を直接付加した場合、4.2 K までの温度領域で超伝導性が発現しないことは確認しており [3]、ここでは



(a) MIR-HEBMのSEM写真及び断面概略図



(b) MIR-HEBMの典型的なI-V特性。

図7 MIR-HEBMのSEM写真と電流-電圧特性

Nb/NbN 二層膜について、Niによる超伝導性の抑圧を試みた。まず超伝導ストリップを構成するNb (2.5 nm)/NbN (5 nm) 二層膜を成膜、次に想定しているMIR-HEBM電極の作製プロセスと同様に、表面酸化層除去を目的としたArイオンビームによる約1 nmのNb表面のエッチングを行い、その後、Ni (1.8 nm)、そしてAu (55 nm)を連続成膜した。図6にAu/Ni/Nb/NbN多層膜の抵抗温度依存性を示す。結果としてAu/Ni (1.8 nm) 二層膜の付加により、多層膜は少なくとも4.2 Kまで超伝導性は観測されないことを確認した。今回のMIR-HEBMには、このAu/Ni二層膜を電極膜として採用している。

中赤外領域で動作するアンテナ構造を作製するには、

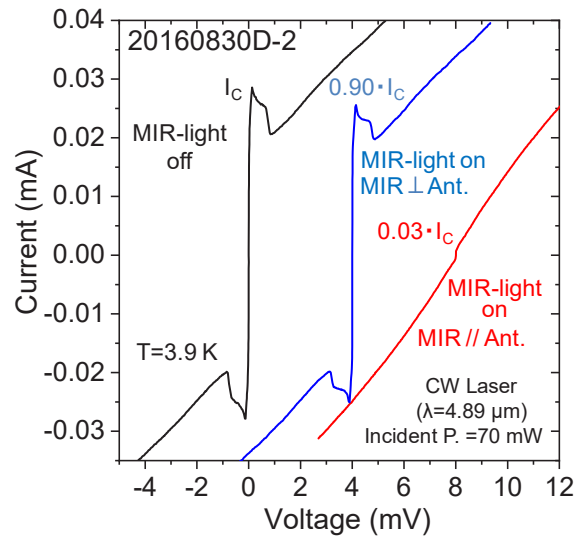


図8 中赤外光照射におけるMIR-HEBMの偏波面依存性

ナノスケールの微細構造構築技術が必要となる。そこですべてのリソグラフィプロセスに電子ビームリソグラフィを使用し、MgOを無機レジストとして用いた新しい製造プロセスを考案した。この製造プロセスの詳細はすでに報告している[4][5][9]。図7(a)は、作製したMIR-HEBMのSEM写真を示す。挿入図はアンテナ給電点付近の拡大図である。SEM写真から得られた実際の超伝導ストリップの長さ及び幅は、それぞれ約0.18 μm、0.26 μmであった。試作したMIR-HEBMの典型的なI-V特性を図7(b)に示す。作製されたHEBMの素子抵抗として、アンテナ設計インピーダンスに近い約200 Ωが得られた。

HEBMに中赤外光を照射した場合、そのエネルギーは主にアンテナ給電点に配置した超伝導ストリップで消費される。その結果、ストリップ内の電子温度は上昇し、超伝導ストリップの臨界電流( $I_C$ )は減少する。しかし、今回使用したツインスロットアンテナは共振型アンテナであり、明確な偏波面依存性が存在し、MIR-HEBMの中赤外光応答には偏波面依存性が予想された。図8に図7(b)素子とは異なるが、同一のツインスロットアンテナを有するMIR-HEBMの照射光偏波面依存性を示す。ここで照射光としてアンテナ偏波面に対して垂直もしくは水平偏波面の中赤外光(波長4.89 μm)を使用、照射電力は共に同一になるようにパワーメーターで調整・確認している。図8から垂直偏波の中赤外光照射に対しては、 $I_C$ は照射前の約90%に減少したが、水平偏波に対しては照射前の3%まで大幅に減少した。このことはアンテナ動作に起因する偏波面依存性の存在を明確に示している。

### 3 MIR-HEBM の応答特性評価

#### 3.1 MIR-HEBM 評価測定系の構築

誘電体基板上に作製された薄膜アンテナの利得は、通常、誘電率の高い基板側が強くなるが、基板誘電率に応じて空間側にも若干存在する。厚い誘電体基板上に形成されたスロットアンテナの基板方向  $P_d$  と空間方向  $P_v$  の放射電力比は次式で表される [5]。

$$P_d = \frac{3}{2} \epsilon_d P_v \quad (1)$$

ここで  $\epsilon_d$  は基板材料の比誘電率である。中赤外領域での MgO 基板の誘電率は、THz 領域の約 28 % にまで減少し、 $\epsilon_{MgO} = 2.637$  ( $n = 1.624$  @  $\lambda = 5.35 \mu\text{m}$  [6] から導出) が報告されている。その結果、空間側の前面利得は、基板側の 25 % 程度存在することが予想される。今回、この空間側利得を利用することで、ビームスプリッタを除外したミキサ雑音温度評価測定系を構築した。図 9 に構築した MIR-HEBM 雑音温度及び IF 帯域幅評価測定系を示す。局部発振源 (LO) としては波長  $4.89 \mu\text{m}$  ( $61.3 \text{ THz}$ ) の中赤外量子カスケードレーザ (QCL) を用いている。LO は、バンドパスフィルタ (BPF)、CaF<sub>2</sub> 真空窓、サファイア熱遮蔽、オフセットパラボラミラーを介して空間側から HEBM に照射している。また、室温黒体及び 1,100 K 黒体炉からの熱輻射を信号源として使用しており、BPF、CaF<sub>2</sub>

真空窓、サファイア熱遮蔽を介してクライオスタット内に導入、CaF<sub>2</sub> レンズと AR コート付 MgO 超半球レンズにより集光して HEBM に照射している。ここで信号源側の光学系全透過率は約 50 % であった。ミキサからの IF 信号は、バイアスティーを介して 1 ~ 18 GHz の冷却低雑音増幅器によって増幅した。ここで、MIR-HEBM の IF 帯域幅評価のための電圧パルス波形観察においては、冷却低雑音増幅器からの信号を直接オシロスコープ (KEYSIGHT 社製 Infinium 9000 : 帯域幅 4 GHz) で波形観測した。一方、ミキサ雑音温度評価においては、冷却低ノイズ増幅器からの IF 出力を更に 8 k ~ 3 GHz、利得 40 dB の室温増幅器で増幅し、中心周波数 1 GHz、バンド幅 1 GHz の BPF を介して、ダイオード検出器を用いて検出している。

図 9 において、MIR-HEBM を実装する冷凍機と LO 源である QCL とは、別の筐体に固定されている。そのため、これまでは GM 冷凍機の機械振動等により、HEBM と LO との結合効率が周期的に変化してしまい、ミキサ雑音温度評価に必要な、安定した IF 出力評価の障害となっていた。そこで今回、ボイスコイルを用いた LO 照射電力の安定化を試みた。適切な LO 照射の下、直流電圧源で HEBM に電圧バイアスを印加した場合、HEBM に流れる直流電流は、実際に超伝導ストリップで消費される LO 電力に依存して変化すると考えられる。そこで直流電流を常に一定になるよ

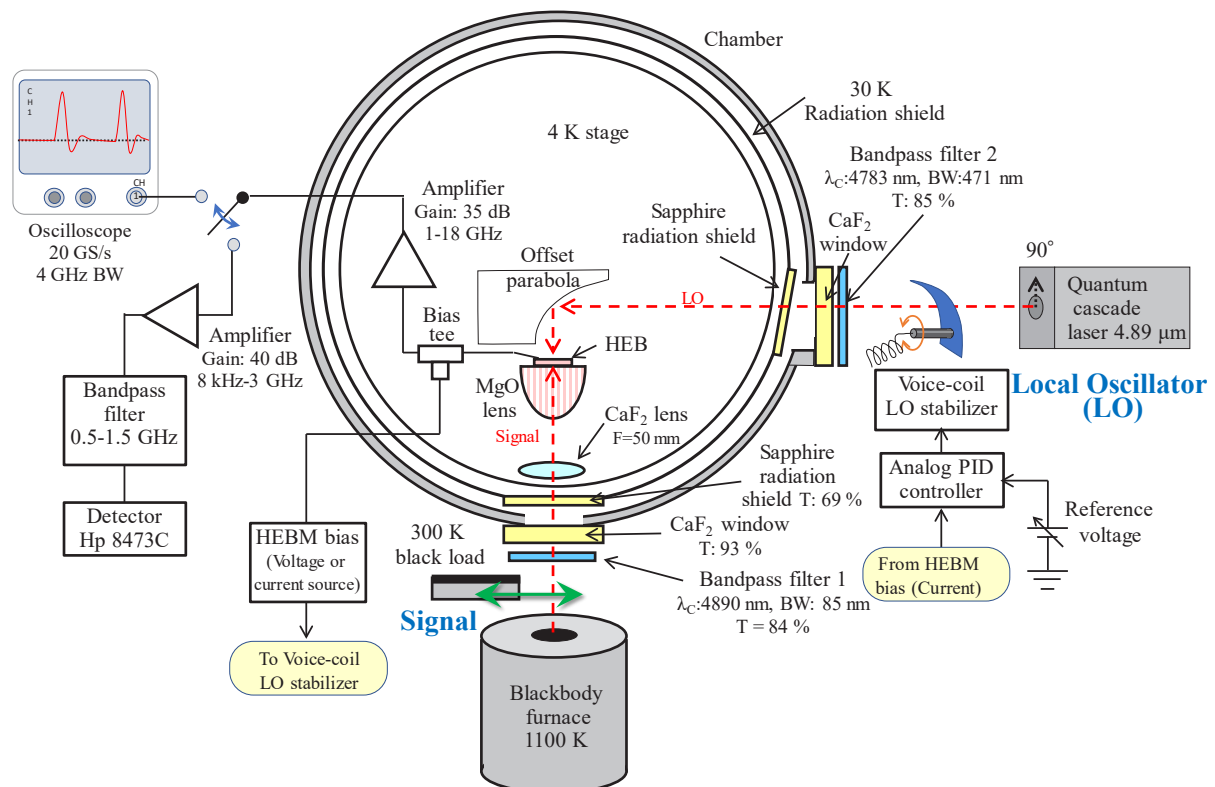


図 9 MIR-HEBM 雑音温度及び IF 帯域幅評価測定系

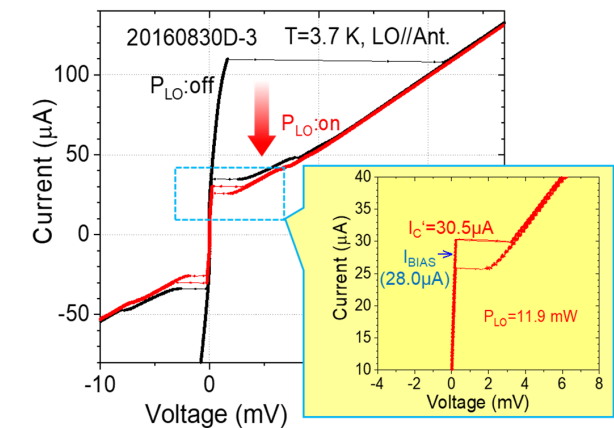
うにPID制御を行い、その出力でボイスコイルを駆動、QCL出力(光束径約2 mmの光束)を物理的に絞ることで、LO照射電力の安定化を行っている。

### 3.2 MIR-HEBMのIF帯域幅及び雑音温度評価

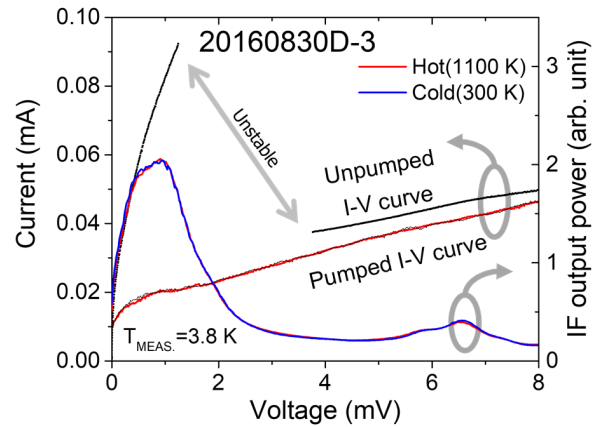
MIR-HEBMに適切なLOを照射し、抑圧された臨界電流( $I_c'$ )付近に定電流バイアス( $I_{BIAS} < I_c'$ )を印加した場合、観察している $I_c'$ は低周波での平均値であり、実際にはLO照射電力の揺らぎにより、抑圧された臨界電流も $I_c'$ 値を中心に高速で揺らいでいると考えられる。ここで抑圧された臨界電流が、発生頻度は極めて少ないと考えられるが、揺らぎにより $I_{BIAS}$ 未満まで減少した場合、MIR-HEBMは電圧状態にスイッチする。適切なLO照射電力及びバイアス電流下ではMIR-HEBMはラッチせず、すぐにゼロ電圧状態に復帰する。この一連の動作は、ランダムな電圧パルス発生として観測され、パルス発生頻度を十分下げた状態では、パルス波形の時間幅はHEBM緩和時間で決まると考えられる。そこでHEBMの応答特性をローパスフイ

ルタモデルで仮定し、電圧パルスをそのインパルス応答と考えることで、このパルス波形からミキサIF帯域幅を導出した。図10にパルス電圧波形観測時におけるMIR-HEBMのI-V特性(a)と、観測された電圧パルス波形(b)を示す。今回、LO照射により $I_c = 110 \mu A$ から $I_c' = 30.5 \mu A$ まで抑圧、 $I_{BIAS} = 28 \mu A$ に直流電流バイアスを行った場合、ランダムに発生する電圧パルスを観察できた。得られた4,096個の電圧パルスをオシロスコープで平均化し、波形観測したところ、パルス半値全幅として約0.21 nsが得られた(図10(b))。このパルス半値全幅から導出したMIR-HEBMのIF帯域幅は、約0.9 GHzと見積もられた。既に、THz帯HEBMのIF帯域幅として、3~5 GHz[9][10]が報告されているが、今回の評価法では平均化した電圧パルスからの推定であることから、MIR-HEBMにおいてもIF帯域幅は更に広い可能性があると考えている。今後、より適切な評価法の検討を行う予定である。

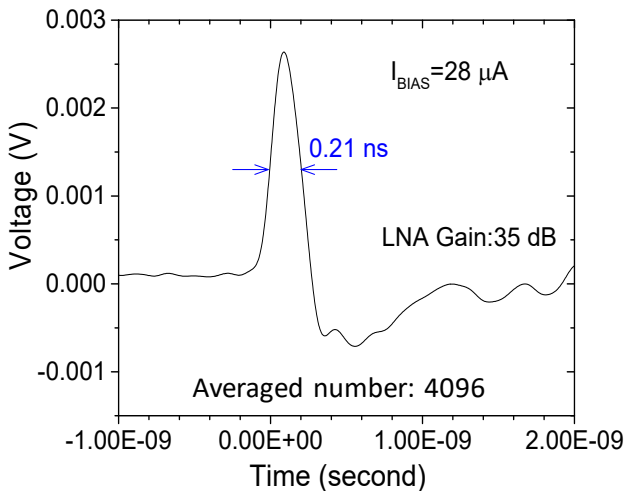
図11(a)にIF信号出力のバイアス電圧依存性を示す。IF出力はバイアス電圧1.2 mV付近で最大を示し



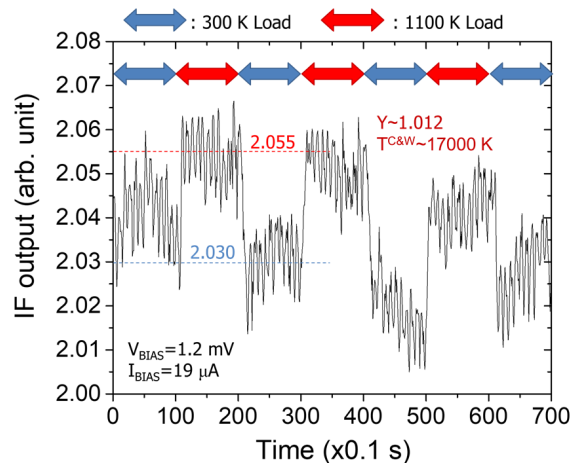
(a) パルス電圧出力観測時のI-V特性とバイアス電流値



(a) 中赤外光照射時における電流及びIF出力の電圧依存性



(b) パルス電圧出力波形



(b) 1100 K及び300 K黒体輻射に対するIF出力

図10 中赤外光照射時において観測された出力パルス電圧波形

図11 MIR-HEBMのI-V特性及びIF出力応答

た。しかし同図からは異なる黒体温度に対する明確な IF 出力差を確認できなかった。これは GM 冷凍機の機械的振動による HEBM と LO との結合効率の振動重量が、一原因であると考えている。そこでまず、1.2 mV 付近のバイアス電圧において、IF 出力が最大となる直流電流を LO 電力により決定する。次に、ボイスコイルを用いてこの直流電流を一定に保つことで、実質的な LO 照射電力の安定化を行い、IF 出力の信号源温度依存性の測定を試みた。図 11(b) に 1,100 K 及び 300 K の黒体輻射を 10 秒ごとに MIR-HEBM に照射した際の IF 出力の変化を示す。LO 照射電力の安定化の結果、わずかであるが信号源温度の差による IF 出力の変化を観測した。図 11 (b) において、時間領域 10 ~ 20 秒間と 20 ~ 30 秒間での IF 出力電力比 (Y ファクタ) は約 1.012 であった。

周波数の低いサブミリ波周波数領域では、黒体輻射にレイリー・ジーンズの式を用いることで、次式により測定した Y ファクタと二つの黒体温度 ( $T_{hot}$ ,  $T_{cold}$ ) から受信機雑音温度  $T^{R-J}$  を求めることができる。

$$T^{R-J} = \frac{T_{hot} - Y T_{cold}}{Y - 1} \quad (2)$$

しかし、今回の動作周波数は 61 THz と高く、零点振動の影響を無視できない。そこで単位周波数当たりの輻射電力としてプランクの放射式に Callen と Welton の結果 [10] を加えた次式を用いた。

$$P^{C\&W} = P^{Plank} + \frac{hf}{2} = k_B T \left[ \frac{\frac{hf}{k_B T}}{\exp\left(\frac{hf}{k_B T}\right) - 1} \right] + \frac{hf}{2} \quad (3)$$

ここで  $T$  は黒体温度、 $k_B$  はボルツマン定数、 $h$  はプランク定数、 $f$  は輻射光の周波数である。次に雑音温度を (単位周波数当たりの雑音電力) /  $k_B$  と仮定することで、以下の式から零点振動を考慮した雑音温度  $T^{C\&W}$  を導出することができる。

$$T^{C\&W} = T \left[ \frac{\frac{hf}{k_B T}}{\exp\left(\frac{hf}{k_B T}\right) - 1} \right] + \frac{hf}{2k_B} \quad (4)$$

上記雑音温度から Y ファクタ法による受信機雑音温度  $T_R^{C\&W}$  は次式で表される。

$$T_R^{C\&W} = \frac{T_{1100K}^{C\&W} - Y T_{300K}^{C\&W}}{Y - 1} \quad (5)$$

$Y=1.012$  及び (4)、(5) 式から、今回の LO 周波数 61.3 THz、IF 中心周波数 1 GHz における受信機雑音温度を約 17,000 K (DSB) と見積もった。現状では同周波数領域での受信機雑音温度評価の報告は極めて少ないが、東北大学のグループ [11] により MCT フォトダイオードを用いた報告 (3,000 K @  $f = 29$  THz) がなされてい

る。今後、各素子パラメータの最適化と評価系の改良を行うことで、更なる低雑音化が可能と考えている。

## 4 おわりに

MIR-HEBM の設計を目的として、中赤外領域での極低温下における金薄膜の複素表面インピーダンス評価を行った。得られた結果を電磁界シミュレータに導入することで、中赤外アンテナ・分布定数回路の精度の良い設計が可能となった。中赤外ツインスロットアンテナを備えた MIR-HEBM を設計・試作し、ミキサ特性を評価した。HEBM から観測された電圧パルス波形から HEBM の IF 帯域幅を評価した結果、約 0.9 GHz が得られた。またビームスプリッタを使用しない中赤外ミキサ雑音温度評価系を構築し、信号源温度の差による IF 出力差から 61.3 THz におけるミキサ雑音温度として約 17,000 K (DSB) が得られた。

### 【参考文献】

- 1 D. Büchel, P. Pütz, K. Jacobs, M. Schultz, U. U. Graf, C. Risacher, H. Richter, O. Ricken, H. W. Hübers, R. Güsten, C. E. Honingh, and J. Stutzki, "4.7-THz Superconducting Hot Electron Bolometer Waveguide Mixer," IEEE Trans. Appl. Supercond., vol.5, no.2, pp.207-214, 2015.
- 2 Y. Irimajiri, A. Kawakami, I. Morohashi, M. Kumagai, N. Sekine, S. Nagano, S. Ochiai, S. Tanaka, Y. Hanado, Y. Uzawa, and I. Hosako, "Development of a Superconducting Low-Noise 3.1-THz Hot Electron Bolometer Receiver," IEEE Trans. THz Sci. Technol., vol.5, no.6, pp.1154-1159, 2015.
- 3 A. Kawakami, Y. Irimajiri, T. Yamashita, S. Ochiai, and Y. Uzawa, "Broadening the IF band of a THz hot electron bolometer mixer by using a magnetic thin film," IEEE Trans. THz Sci. Technol., vol.8, no.6, pp.647-653, 2018.
- 4 J. Horikawa, A. Kawakami, M. Hyodo, S. Tanaka, M. Takeda, and H. Shimakage, "Evaluation of nano-slot antenna for mid-infrared detectors," Infrared Phys. Technol., vol.67, pp.21-24, 2014.
- 5 J. Horikawa, A. Kawakami, M. Hyodo, S. Tanaka, M. Takeda, and H. Shimakage, "Study of Mid-Infrared Superconducting Detector with Phased Array Nano-Slot Antenna," IEEE Trans. Appl. Supercond., vol.25, artl. no.2301005, 2015.
- 6 R. E. Stephens and I. H. Malitson, "Index of Refraction of Magnesium Oxide," J. Res. Natl. Bur. Stand. vol.49 pp.249-252, 1952.
- 7 D.C.Harris, et al., "Refractive index of infrared-transparent polycrystalline alumina," Optical Engineering, vol.56, no.7, 077103 2017.
- 8 Y. Irimajiri, A. Kawakami, I. Morohashi, M. Kumagai, N. Sekine, S. Nagano, S. Ochiai, S. Tanaka, Y. Hanado, Y. Uzawa, and I. Hosako, "Development of a Superconducting Low-Noise 3.1-THz Hot Electron Bolometer Receiver," IEEE Trans. THz Sci. Technol., vol.5, pp.1154-1159, 2015.
- 9 A. Kawakami, H. Shimakage, J. Horikawa, M. Hyodo, S. Saito, S. Tanaka, and Y. Uzawa, "Design and Fabrication for the Construction of MIR HEB Mixers," IEEE Trans. Appl. Supercond., vol.27, artl. no.2300105, 2017.
- 10 A. R. Kerr, IEEE Trans. Microw. Theory Techn., vol.47, pp.325-329, 1999.
- 11 Sato, T.M., H. Fujiwara, Y.O. Takahashi, Y. Kasaba, V. Formisano, M. Giuranna, and D. Grassi, "Tidal variations in the Martian lower atmosphere inferred from Mars Express Planetary Fourier Spectrometer temperature data," Geophys. Res. Lett., vol.38, L24205, doi:10.1029/2011GL050348, 2011.





**川上 彰** (かわかみ あきら)

未来 ICT 研究所  
フロンティア創造総合研究室  
主任研究員  
博士 (工学)  
ジョセフソンアレー発振器、超伝導ヘテロダイ  
ン受信機、中赤外光ナノアンテナ・分布定  
数回路、超伝導デバイス作製技術



**堀川隼世** (ほりかわ じゅんせい)

福井工業高等専門学校  
電気電子工学科  
講師  
博士 (工学)  
中赤外光領域のアンテナを用いた光検出器の  
研究



**島影 尚** (しまかげ ひさし)

茨城大学  
工学部  
教授  
博士 (工学)  
YBCO 系超伝導体のジョセフソン接合作製や  
その高周波応答の研究



**田中秀吉** (たなか しゅうきち)

未来 ICT 研究所  
フロンティア創造総合研究室  
研究マネージャー  
博士 (理学)  
超伝導・低次元物性、分子ナノデバイス、ナ  
ノバイオ融合領域の研究



**鵜澤佳徳** (うざわ よしのり)

国立天文台  
教授  
博士 (工学)  
超伝導エレクトロニクス、ALMA 受信機など  
の研究開発