

2-2 磁性材料を用いた 2 THz 帯超伝導ホットエレクトロンボロメータミキサ

2-2 2THz Hot Electron Bolometer Mixer Using Magnetic Material

川上 彰 入交芳久

KAWAKAMI Akira and IRIMAJIRI Yoshihisa

超伝導ホットエレクトロンボロメータミキサ (HEBM) は、二つの近接した金属電極を超伝導極薄ストリップで接続した構造を有し、1.5 THz 以上の周波数領域において極低雑音動作が報告されている。我々は HEBM の積年の課題であった中間周波数 (IF) 帯域の拡大を実現するため、磁性材料により超伝導の発現箇所を制御する新構造 HEBM (Ni-HEBM) を提案した。磁性材料としてニッケル (Ni) 薄膜を HEBM 電極に採用することで、電極直下の窒化ニオブ (NbN) 薄膜の超伝導を抑制できることを確認、電極間の僅か 0.1 μm 長のブリッジ部のみ NbN を超伝導化することに成功した。その結果、Ni-HEBM の IF 帯域幅は、従来の格子冷却型 HEBM の約 3 GHz から約 6.9 GHz に向上した。また、2 THz におけるミキサ雑音温度として、光学系損失の補正後の値で約 570 K (DSB) という世界トップレベルの低雑音温度を達成した。

The superconducting hot electron bolometer mixer (HEBM) has a structure in which two metal electrodes are connected by a thin superconducting strip, and it shows extremely low noise operation in the frequency range over 1.5 THz. We have proposed a new HEBM structure (Ni-HEBM) using a magnetic thin film to achieve a wider intermediate frequency (IF) bandwidth. By adopting Au/Ni electrodes, the superconductivity of the niobium nitride (NbN) thin film under the electrodes can be suppressed by the magnetization of Ni, and the NbN film becomes superconducting state only at a limited area around a 0.1- μm -long bridge between the two electrodes. The resulting IF bandwidth was improved to about 6.9 GHz, which is much better than 3 GHz in our conventional phonon-cooling HEBM. The fabricated Ni-HEBM also showed an excellent low noise temperature of about 570 K (DSB) at 2 THz after correcting optical losses.

1 まえがき

テラヘルツ周波数領域には様々なガス分子の輝線が存在する。それら輝線スペクトルは、ガス種類、密度、圧力、温度など様々な情報を与え、地球温暖化や大気汚染等に資する地球環境計測や、星や銀河の誕生や進化などを明らかにするテラヘルツ天文学などのリモートセンシング技術に活用することができる。また安心・安全を支えるセキュリティ技術、新たな周波数領域開発による大容量無線通信技術など、未開拓周波数領域であるテラヘルツ周波数領域には、様々な応用が期待されている。

ヘテロダイン受信機はリモートセンシング技術における重要な要素である。このヘテロダイン受信機を構成するミキサ素子の一つに超伝導 SIS ミキサが存在する。同ミキサは極薄トンネル障壁を二つの超伝導電極

で挟んだ構造を基に、電極間に流れる極めて非線形性の強いトンネル電流を利用したミキサで、今日、1 THz までの周波数領域において、最も低雑音、広 IF 帯域の優れた特性を報告している [1]-[3]。しかしその構造に起因する比較的大きな接合容量から、動作周波数帯での同調回路が不可欠になっている。この同調回路は低損失導体薄膜で構成する必要がある、従前から主に超伝導薄膜材料が用いられてきた。しかし超伝導材料には転移温度 (T_c) に起因する、低損失特性の上限を決めるギャップ周波数が存在し、現状では 1.5 THz 以上の超伝導 SIS ミキサの実現は困難であると考えられている。

現在、1.5 THz を超える周波数領域における低雑音ミキサ素子として、超伝導ホットエレクトロンボロメータミキサ (HEBM) の研究・開発が進められている。HEBM は、二つの近接した金属電極を超伝導薄膜

で形成したストリップで接続した構造で、この超伝導ストリップの T_c 付近での大きな抵抗変化を利用したポロメータである。図1にHEBMの概略図を示す。既に2 THz以上の周波数領域において、量子雑音限界の10倍を切るHEBMの低雑音受信機動作をいくつかの研究機関が報告しており[4]-[6]、NICTにおいても3.1 THzにおいて量子雑音限界の約8倍である1200 K (DSB)の受信機雑音温度を報告している[7]。しかしHEBMの課題の一つとして、超伝導SISミキサと比較してIF帯域幅が狭いことが挙げられている。IF帯域幅として20 GHz以上を確保できるSISミキサに対し、HEBMは3~5 GHzが典型的な値である[8][9]。IF帯域幅は一度に観測できる情報量を意味し、その拡大は応用上メリットが大きい。

HEBMにおけるIF帯域幅の拡大には、励起電子の効率的な冷却、すなわちミキサ緩和時間の短縮が重要である。HEBMはこの緩和時間を決定する冷却過程により、格子冷却型と拡散冷却型に大別される。前者は励起エネルギーを超伝導ストリップ内の格子を介して基板に放出するタイプで、今日の多くのHEBM研究報告は、この冷却過程を素子設計原理としている。格子冷却型におけるIF帯域幅拡大の指針は、超伝導ストリップの T_c に依存する電子-フォノン相互作用時間と、ストリップ膜厚に依存するフォノンエスケープ時間の各々の短縮である。チャルマース工科大学のグループは、高 T_c 材料である二ホウ化マグネシウム (MgB_2) 極薄膜を用いることで電子-フォノン相互作用時間の短縮を図り、11 GHzのIF帯域幅を報告している[10][11]。しかし MgB_2 材料は常伝導抵抗率が低く、極微細加工が困難、また高 T_c 材料であることから、ミキサ動作に必要なLO電力が過大になりやすく、その低減が課題であると考えられる。またモスクワ州立教育大学のグループは、窒化ニオブ (NbN) 超伝導ストリップと基板との音響整合改善によりフォノンエスケープ時間の短縮を図り、8 GHzのIF帯域幅を報告した[12]。しかしこのIF帯域幅は、 NbN 超伝導ストリップの T_c 付近 (10.5 K) の動作温度で得られた結果であり、優れた低雑音特性を示す動作温度 (約4 K) との差異が応用上の課題として残っている。

一方、拡散冷却型は、超伝導ストリップ内の励起電子を直接熱浴である電極に拡散させる冷却過程で、電極間距離 (超伝導ストリップ長) の短縮と電子拡散定数の大きい超伝導材料の採用により、IF帯域の広帯域化が実現できる。計算上は微細加工技術により限度なくIF広帯域化が図れるメリットから、当初、 NbN に比べ電子拡散定数が大きいアルミニウム (Al) やニオブ (Nb) を使用した拡散冷却型HEBMの研究が多く成された[13]-[15]。しかし有効な素子インピーダンス確保

において、Nb、Al材料などの低い抵抗率は、長さ幅共に0.1 μm 程度の極微細な超伝導ストリップを要求し、結果として加工精度による素子特性の再現性や、極微細化による電氣的強度の低下、低 T_c 材料の使用による低いミキサ動作温度などの多くの問題が生じた。

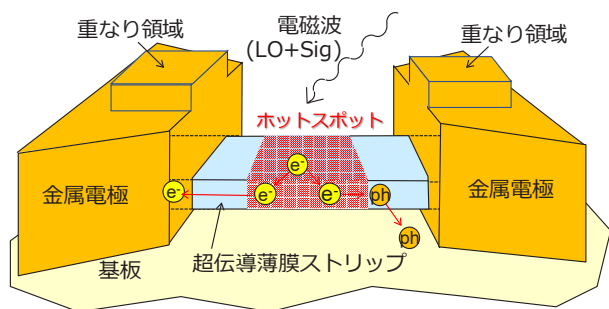
このような背景の下、当初我々は、格子冷却型HEBMの研究を開始した。エピタキシャル NbN 極薄膜 (膜厚3.5 nm) を用いたHEBMは、3.1 THzにおいて量子雑音限界の8倍程度 of 良好な低雑音温度を示したが、IF帯域幅は約3 GHzにとどまった[7]。この研究を通して、本来、格子冷却過程は超伝導ストリップ長に依存しないと考えられたが、実際には格子冷却型HEBMにおいても、超伝導ストリップ長の短縮はIF帯域拡大に有効であることが経験的に分かってきた。このことは格子冷却型HEBMの冷却過程に、拡散冷却が混在していることを示唆している。しかし、 NbN 超伝導ストリップの短縮による性能向上は0.2 μm 程度までで、更なる超伝導ストリップ長の短縮は一概に性能向上につながらなかった。その原因として我々は、電極下部 NbN 薄膜の超伝導性の存在に着目、磁性材料を用いた新たなHEBM素子構造を考案した。磁性体により両電極下の超伝導性を抑圧し、超伝導性を金属電極間のみ限定することで、HEBMの極微小化を実現し、積極的な拡散冷却過程の活用によるIF帯域拡大と高感度化を実現できると考えた[16]。磁性体材料としてニッケル (Ni) を使用したため、新しいHEBM構造をNi-HEBMと呼んでいる。本稿では、Ni-HEBMの素子構造を説明し、実際に試作したNi-HEBMの特性評価結果を報告する。

2 Ni-HEBM 構造の提案と作製

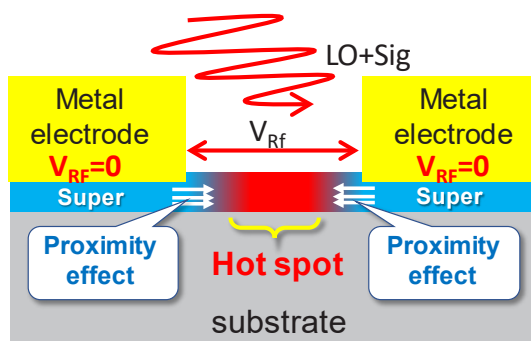
2.1 Ni-HEBM 構造の提案とNi膜によるNbN超伝導の抑制

HEBMは、平面アンテナ等の給電点に相当する電極間に、長さ幅共に数百 nm で膜厚が5 nm 程度未満の微小超伝導ストリップを配置した構造である (図1)。このHEBMに電磁波を照射した場合、アンテナと結合した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、超伝導転移温度を越えた領域に常伝導領域 (ホットスポット) が形成される。照射電磁波として信号源 (Sig) と共に局部発振源 (LO) を照射した場合、その差周波数 (IF) 成分のホットスポットサイズの変調が生じ、インピーダンス変化としてIF出力を獲得できる。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、数十 THz の赤外光領域までのミキサ動作が可能である。

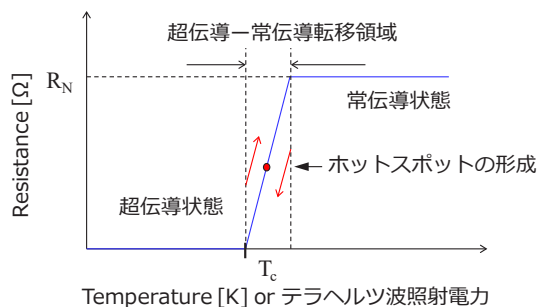
通常ポロメータの微細化は、検出器の高感度化、IF



(a) HEBM 素子の模式図



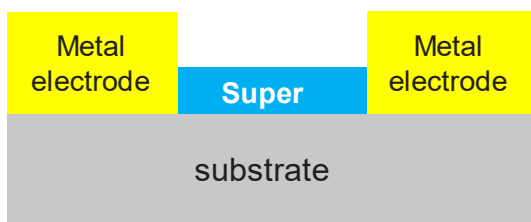
(a) 一般的な HEBM 構造の断面図



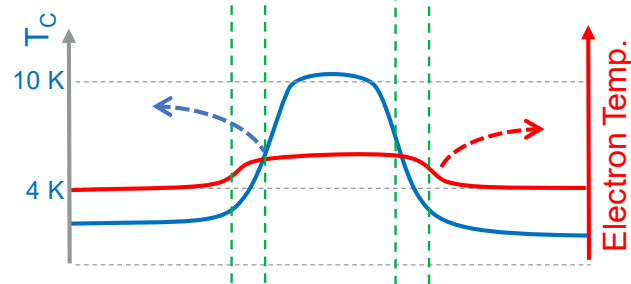
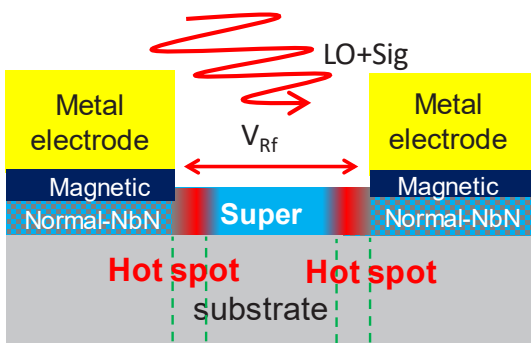
(b) 超伝導薄膜ストリップの抵抗 - 温度特性

図 1 HEBM の構造と動作概要

帯域の広帯域化に有効だが、HEBM の微細化には解決すべき課題が存在する。一般的な HEBM 素子構造において、超伝導ストリップと両電極との間には確実な電氣的接触を確保するために、金属電極が超伝導ストリップ上にオーバーラップしている(図 1(a))。このオーバーラップ領域の超伝導ストリップは、通常ミキサ動作温度においても超伝導状態にあると考えられる。また金属電極下にあるため、電磁波による抑圧を直接受けない。そのため、金属電極下に超伝導が残存していると、近接効果によりこの超伝導性が電極間の超伝導ストリップに染み出し、電磁波照射によるホットスポットの形成を妨げ、ミキサ感度の低下を招くと考えた(図 2(a))。電極間距離を微細化するほど、直接照射電磁波の影響を受けない両電極下の超伝導間の結合が促進され、その結果、ホットスポット形成には、電極間超伝導ストリップ内の電子温度の上昇だけでなく、電極下超伝導の電子温度も上昇させる必要性が生じる。そのため、HEBM の電極間距離を単純に微細化するだけでは、LO 電力の低減及びミキサ性能の向上を期待できない。理想的な HEBM 構造としては、図 2(b)のように電極間にのみ超伝導ストリップを配置することが好ましいが、良好な電氣的接触の観点から実現は不可能である。そこで我々は、超伝導-金属電極薄膜間に磁性ニッケル(Ni) 薄膜を挿入することで電極下の超伝導性を抑圧し、良好な電氣的接続を維持したうえで電極間のみ超伝導性を残す、NICT 独自の新たな



(b) 理想的な HEBM 構造の断面図



(c) 磁性体材料を用いた HEBM 構造の断面図と超伝導ストリップ内 T_c と電子温度分布の概念図

図 2 磁性体材料を用いた HEBM 構造の検討

HEBM 構造 (Ni-HEBM) を提案した(図 2(c)) [16]。ここで電極下から電極間における超伝導ストリップの T_c は連続的に変化するため、LO 照射時のホットスポットは、選択的に電極近傍に形成されると考えている。これは安定なホットスポット形成と励起電子の拡散長の短縮に有効であると考えている。

図 3 に膜厚 5 nm の NbN 薄膜に、直接膜厚 1.8 nm の Ni 薄膜を付加した場合の抵抗-温度特性を示す。ここで Ni 上に成膜した酸化マグネシウム (MgO) 薄膜

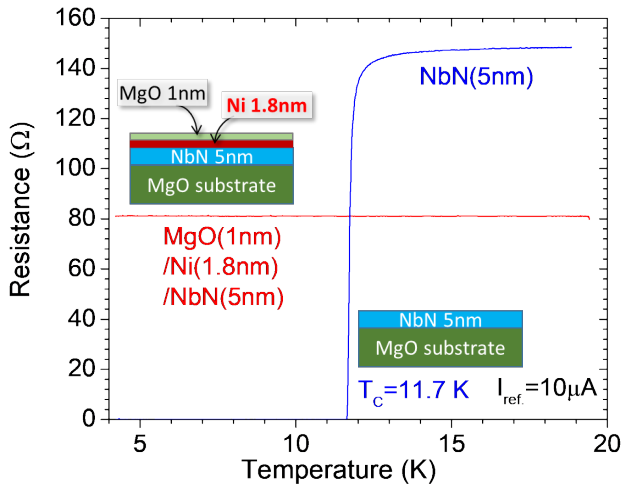


図3 Ni付加によるNbN薄膜の超伝導性の抑圧

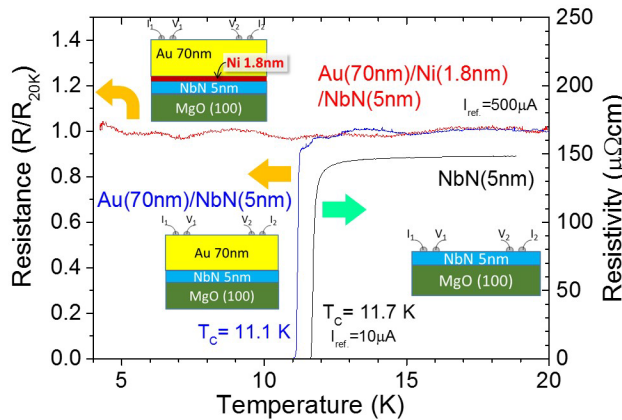
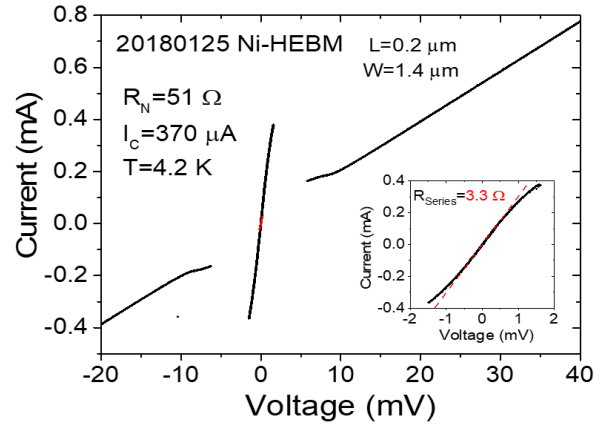


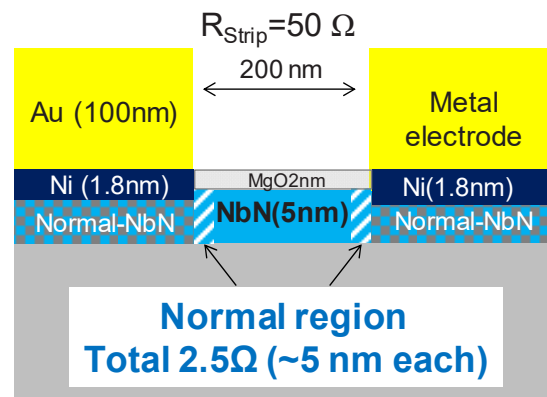
図4 NiによるHEBM金属電極下の超伝導性の抑圧

はNiの酸化防止膜で、Ni、NbN、MgOは全て高真空中にて連続成膜している。各成膜条件の詳細に関しては[15]に記載している。比較として測定したNbN単層膜(膜厚5nm)は、 $T_c=11.7\text{ K}$ の良好な特性を示した。その一方でNiを付加したNi/NbN二層膜では、少なくとも4.2 Kまでの温度領域において、超伝導性は観測されなかった。

次にNi-HEBMの金属電極における超伝導ストリップのオーバーラップ領域を想定して、Au(70nm)/Ni(1.8nm)/NbN(5nm)三層膜の抵抗-温度特性を測定した(図4)。ここでAu/Ni/NbN三層膜は高真空中にて連続成膜している。比較としてNiを用いない従来型のHEBMにおける金属電極を想定したAu(70nm)/NbN(5nm)二層膜及びNbN単層膜の抵抗-温度特性を併記している。図からNbN単層膜に比べAu/NbN二層膜は、Auからの準粒子拡散によると考えられる若干の T_c の低下が見られたが、11 K以下において超伝導性を示した。このことは従来型のHEBM構造では電極下に超伝導性が存在することを明示している。その一方でNiをAu-NbN間に挿入したAu/Ni/NbN



(a) Ni-HEBMのI-V特性



(b) 断面概略図

図5 Ni-HEBMにおける直列抵抗(L=0.2 μm)

三層膜では、少なくとも4.2 Kまでの温度領域で、NbN薄膜の超伝導性を消失できることを確認した。以上のことからAu/Ni二層膜を金属電極に用いることでNi-HEBM構造が実現できることが分かった。

2.2 Ni膜厚の最適化とNi-HEBMの作製

Niの付加による下層NbN薄膜の超伝導性の抑圧は、Niからのスピン電子のNbN内への拡散により生じると考えている。しかしその拡散は薄膜垂直方向だけでなく、水平方向にも拡散・影響することが分かってきた。作製したNi-HEBM(ストリップ長 $L=0.2\text{ }\mu\text{m}$)の典型的なI-V特性と断面概略図を図5に示す。ここでI-V特性は四端子法で測定しているが、約3.3 Ωの直列抵抗が存在していることが分かる。これはAu/Ni/NbN電極薄膜の抵抗と、Niからのスピン電子が薄膜内水平方向へ拡散して、電極近傍の超伝導ストリップ内に形成した常伝導NbN領域の薄膜抵抗(図5(b)参照)との和であると考えた。まず、Au/Ni/NbN電極抵抗を評価したところ0.8 Ωが得られ、Niにより超伝導が消失した電極近傍の常伝導NbNは、約2.5 Ωと見

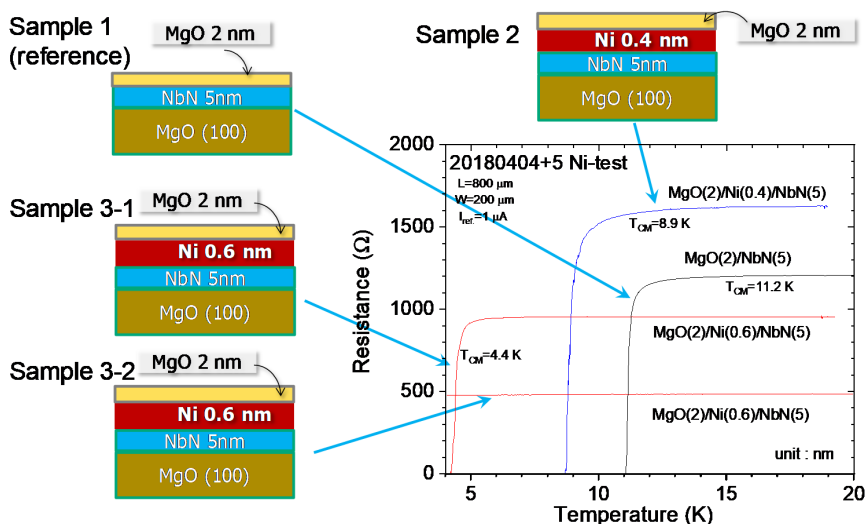
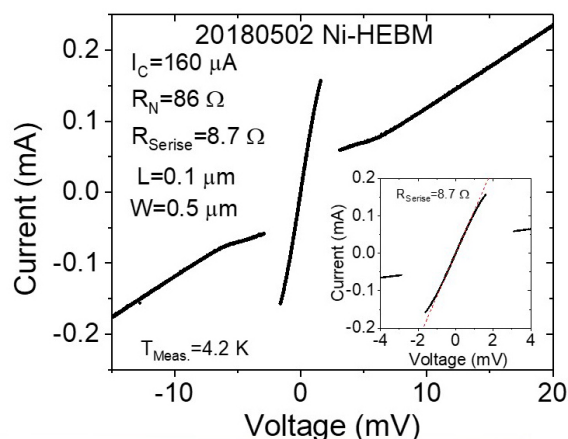
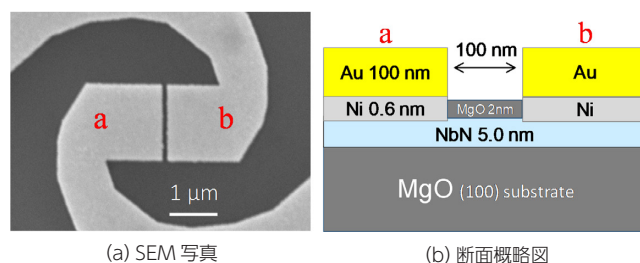


図6 MgO単結晶基板上に成膜したMgO/Ni/NbN三層膜の抵抗温度特性

積もられた。この領域にオームの法則が成り立つと仮定すると、Niにより超伝導性が消失した領域の長さは、両電極近辺に各5 nm程度存在することになる。この常伝導抵抗領域はミキサとしては入力損になり、HEBMの更なる微細化の障害になると考えられる。そこでNi-HEBMの更なる微細化のためには、Ni膜厚の最適化が必要であると考えた。

図6に、MgO単結晶基板上に成膜したMgO(2 nm)/Ni/NbN(5 nm)三層膜の抵抗-温度特性を示す。ここで試料はNi膜厚をパラメータとして、0 nm、0.4 nm、0.6 nmの三種類を作製した。最上部MgO薄膜は、イオンビームスパッタ法により成膜した酸化防止膜である。まずNiを成膜しないMgO/NbN(5 nm)二層膜(Sample 1)の T_c は、約11.2 Kであった。次にNiが0.4 nmのSample 2は、Sample 1に比べ T_c の低下が見られたが、8.9 Kで超伝導転移を示した。Sample 3はNi膜厚が0.6 nmで二試料作製したが、一つは $T_c = 4.4$ K、もう一つは4.2 Kまで超伝導転移を示さなかった。この結果は、Ni膜厚0.6 nmにおける三層膜の T_c は液体ヘリウム温度(4.2 K)付近に存在し、主としてNi及びNbN各膜厚の制御精度により T_c が分布したものと考えている。ここで実際のNi-HEBMでの電極構造は、作製プロセス上、NbNストリップ表面(膜厚5 nm)をArイオンビームで1 nm程度削った後、Au/Ni二層電極膜を成膜するため、電極下のNbN薄膜 T_c は、膜厚5 nmのNbNに比べ低下していると考えられる。よってNi膜厚としては、0.6 nmが適切であると判断した。今回、超伝導ストリップ長 $0.1 \mu\text{m}$ のNi-HEBM作製では、膜厚0.6 nmのNi薄膜を採用している。

図7に作製した超伝導ストリップ長 $0.1 \mu\text{m}$ のNi-HEBMのSEM、断面概略図と電流-電圧特性を示す。



(c) 4.2 KにおけるNi-HEBMの典型的な電流-電圧特性

図7 Ni-HEBM(超伝導ストリップ長 $0.1 \mu\text{m}$)のSEM写真、断面概略図と電流-電圧特性

今回の2 THz帯Ni-HEBM作製プロセスでは、主たるリソグラフィプロセスに電子ビーム描画を採用した新しい製造プロセスを考案している。この製造プロセスの詳細は、参考文献[16]において説明している。作製したNi-HEBMの超伝導ストリップ幅は $0.5 \mu\text{m}$ で、素子抵抗は約 86Ω であった。しかしゼロ電圧における直列抵抗として 8.7Ω が観測された。その結果、金属電極抵抗(約 0.8Ω)を考慮しても、NbNストリップ内に存在するNiの影響による常伝導抵抗は約 7.9Ω であると推定される。今後、Ni-HEBMの更なる微細化に

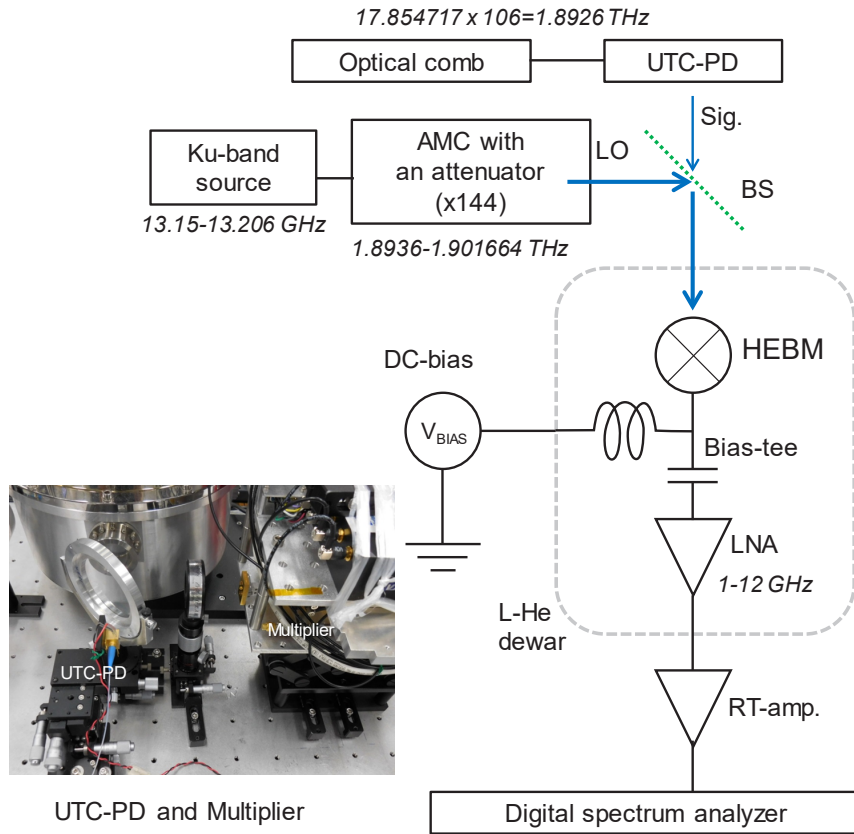
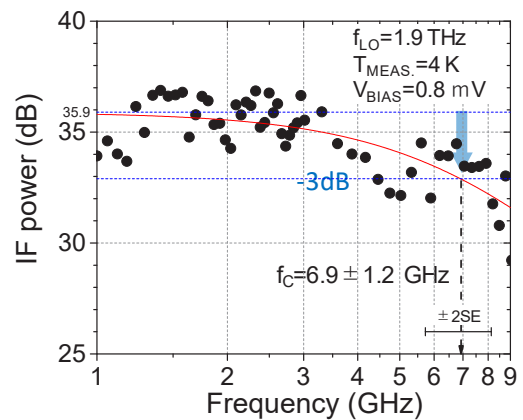


図8 1.9 THzにおけるNi-HEBMのIF帯域幅評価系

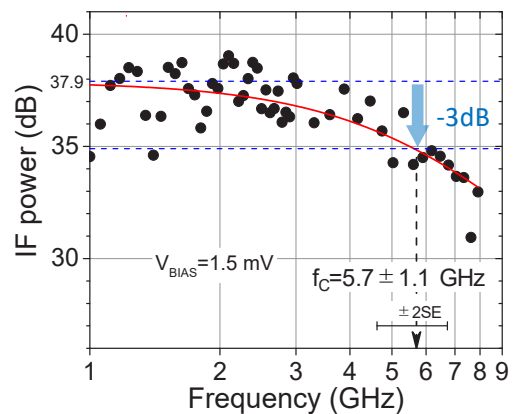
は、この直列抵抗の軽減が重要であると考えている。

3 Ni-HEBMのミキサ特性の評価

1.9 THzにおけるNi-HEBMのIF帯域幅評価系を図8に示す。ここでLO源としてはVDI社製のAMC (Amplifier Multiplier Chains)を使用している。信号源 (Sig.)としては、約17.9 GHz間隔の光コムにおける106個離れた二波を選別し、単一走行キャリア・フォトダイオード (UTC-PD)に照射し、1.9 THzの微弱ではあるが安定な信号を生成・利用している。Ni-HEBMにはバイアステーを介してDCバイアス電圧 (V_{BIAS})を印加した。電圧バイアスしたNi-HEBMにLOを照射した場合、その照射電力に応じてミキサに流れる直流バイアス電流が減少する。これは消費されるLO電力に応じて、ホットスポットサイズが増減するためである。今回のIF帯域幅評価では、信号源周波数を固定してLO周波数を変化させたが、ミキサで消費するLO電力は一定に保つ必要がある。しかしAMCからの出力電力は発振周波数変化に対して若干変動するため、本評価では、Ni-HEBMを同じ状態で動作させるために、流れる直流バイアス電流が一定になるようにAMC付属の減衰器でLO出力を制御し、HEBMで消費されるLO電力を一定に保っている。IF出力は、



(a) The strip length $L=0.1 \mu\text{m}$



(b) The strip length $L=0.2 \mu\text{m}$

図9 Ni-HEBMのIF帯域評価

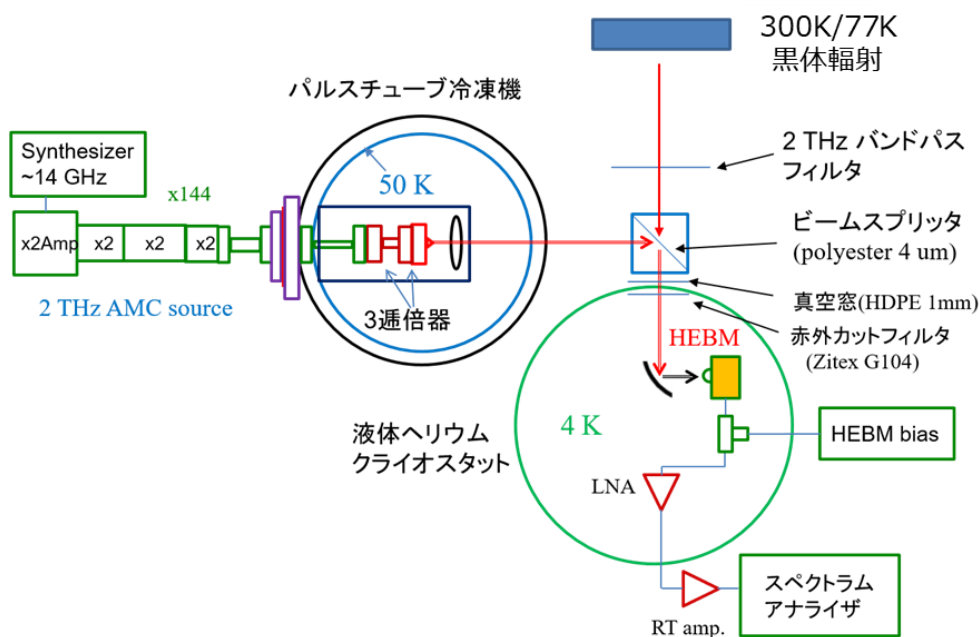


図 10 2 THz における Ni-HEBM の受信機雑音温度評価系

1 ~ 12 GHz の帯域幅を持つ低雑音冷却アンプ (LNA) 及び室温動作低雑音アンプで増幅、デジタルスペクトラムアナライザで測定している。アンプ等のゲイン周波数依存性は、IF ピーク出力値と IF 信号付近のグラウンドレベルの差を IF 出力値として計測することで、除外している。また全ての測定は約 4 K で実施している。

図 9 (a) に Ni-HEBM ($L = 0.1 \mu\text{m}$) の IF 帯域評価結果を示す。比較として超伝導ストリップ長 $L = 0.2 \mu\text{m}$ の Ni-HEBM の評価結果 ($f_{C-L=0.2\mu\text{m}} = 5.7 \pm 1.1 \text{ GHz}$) も図 9 (b) に併記している。ここで各ミキサの IF 帯域幅は Low-pass-filter model でフィッティングして決定しており、誤差関数 σ を用いて測定誤差範囲を $\pm 2\sigma$ で示している。図から分かるように Ni-HEBM ($L = 0.1 \mu\text{m}$) の IF 帯域幅 (-3 dB 遮断周波数 (f_c)) は $f_{C-L=0.1\mu\text{m}} = 6.9 \pm 1.2 \text{ GHz}$ となった。この結果は、超伝導ストリップ長 $0.2 \mu\text{m}$ の Ni-HEBM に比べ 1 GHz 以上広帯域化しており、超伝導ストリップ長の短縮により IF 帯域幅が拡大したと考えている。また NICT における一般的な格子冷却型 HEBM[7] に比べ約 4 GHz の改善が成されており、Ni-HEBM 構造の有効性を示しているものと考えている。

受信機雑音温度評価系 (図 10) において、信号源として 300 K/77 K の黒体輻射を測定することで、2 THz における Ni-HEBM 受信機の雑音温度評価を行った [17]。図 11 に黒体温度を 300 K/77 K に変化させたときの IF 出力変化を示す。ここで測定した Ni-HEBM ($L = 0.1 \mu\text{m}$) は、IF 帯域評価時の素子と同一素子である。得られた IF 出力比 (0.65 dB) から 2 THz における

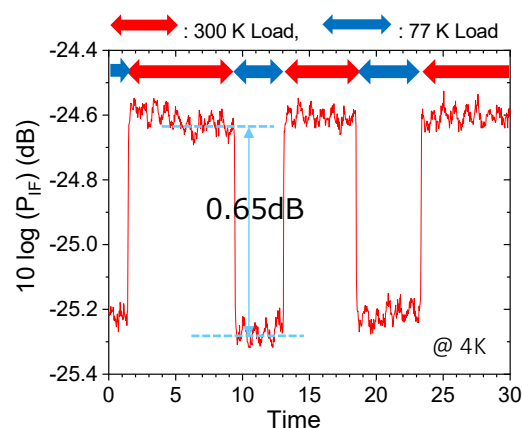


図 11 2 THz における Ni-HEBM の受信機雑音温度評価結果

受信機雑音温度として $T_{rx(DSB)} = 1,220 \text{ K}$ が得られた。また信号入射光学系に配置した 2 THz 帯 Band-pass-filter とビームスプリッタ、さらにミキサの冷却に用いられた液体ヘリウムクライオスタットの真空窓と赤外カットフィルタの損失を補正後した後の雑音温度として $T_{rx corr. (DSB)} = 570 \text{ K}$ が得られた。今回の IF 帯域幅及びミキサ雑音温度の各評価は共に約 4 K での結果である。THz 帯 HEBM の性能報告としては共に世界トップレベルの性能にあると考えており、今後、更なる微細化による性能向上を目指す。

4 結論

THz 帯 HEBM の IF 帯域幅の拡大を目的とした、電極構造に磁性体材料である Ni 薄膜を組み込んだ、NICT 独自の新しい Ni-HEBM 構造を提案した。まず、

厚さ 1.8 nm の Ni 薄膜を厚さ 5 nm の NbN 薄膜上に直接成膜することで、NbN の超伝導性を抑制できることを確認した。次に Ni-HEBM の極微細化を目指して、Ni 膜厚の最適化を検討、膜厚 0.6 nm の Ni 薄膜による Au/Ni 二層膜で、超伝導ストリップを構成する NbN 薄膜の超伝導性を抑圧できることを観測した。この Au/Ni 電極膜を用いたストリップ長 0.1 μm の微小 Ni-HEBM を試作、実際のヘテロダイン受信機の動作周波数、温度である 1.9 THz、約 4 K において、IF 帯域幅を評価した結果、約 6.9 GHz が得られた。これはストリップ長 0.2 μm の Ni-HEBM の IF 帯域幅 5.7 GHz と比較して 1 GHz 以上、そして通常型の HEBM と比較して約 4 GHz 拡大した結果である。また、ストリップ長 0.1 μm の Ni-HEBM の受信機雑音温度を評価した結果、2 THz において約 570 K (DSB) という世界トップレベルの低雑音温度を確認した。

【参考文献】

- 1 W. Shan, T. Noguchi, S. Shi, and Y. Sekimoto, "Design and development of SIS mixers for ALMA band 8," IEEE Trans. on Appl. Supercond. vol.15, pp.503–506, 2005.
- 2 C. E. Tong, P. K. Grimes, A. Barbier, K. Schuster, and M. Wang, "Design and Performance of a 3-Junction Series Distributed SIS Mixer for Wide IF Applications," IEEE Trans. on Appl. Supercond. vol.23, artl. no.1400404, 2013.
- 3 A. Karpov, D. Miller, F. Rice, J. A. Stern, B. Bumble, H. G. LeDuc, and J. Zmuidzinas, "Low Noise 1 THz–1.4 THz Mixers Using Nb/Al-AlN/NbTiN SIS Junctions," IEEE Trans. on Appl. Supercond. vol.17, pp.343–346, 2007.
- 4 A. Shurakov, Y. Lobanov, and G. Goltsman, "Superconducting hot-electron bolometer: from the discovery of hot-electron phenomena to practical applications," Supercond. Sci. Technol., vol.29, no.2, pp.1–27, Feb. 2016, DOI: 10.1088/0953-2048/29/2/023001.
- 5 J. L. Kloosterman, D. J. Hayton, Y. Ren, T. Y. Kao, J. N. Hovenier, J. R. Gao, T. M. Klapwijk, Q. Hu, C. K. Walker, and J. L. Reno, "Hot electron bolometer heterodyne receiver with a 4.7-THz quantum cascade laser as a local oscillator," Appl., Phys., Lett., vol.102, 011123, 2013.
- 6 J. R. Gao, M. Hajenius, Z. Q. Yang, J. J. A. Baselmans, P. Khosropanah, R. Barends, and T. M. Klapwijk, "Terahertz Superconducting Hot Electron Bolometer Heterodyne Receivers," IEEE Trans. on Appl. Supercond. vol.17, pp.252–258, 2007.
- 7 Y. Irimajiri, A. Kawakami, I. Morohashi, M. Kumagai, N. Sekine, S. Naganano, 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.
- 8 K. M. Zhou, W. Miao, S. C. Shi, R. Lefevre, and Y. Delorme, "Noise temperature and IF bandwidth of a 1.4 THz superconducting HEB mixer," URSI AP-RASC., pp.2010–2012, 2016.
- 9 D. Meledin, C. E. Tong, R. Blundell, N. Kaurova, K. Smirnov, B. Voronov, and G. Goltsman, "Study of the IF bandwidth of NbN HEB mixers based on crystalline quartz substrate with an MgO buffer layer," IEEE Trans. on Appl. Supercond. vol.13, pp.164–167, 2003.
- 10 E. Novoselov and S. Cherednichenko, "Low noise terahertz MgB2 hot-electron bolometer mixers with an 11 GHz bandwidth," Appl., Phys., Lett., vol.110, 032601, 2017.
- 11 E. Novoselov and S. Cherednichenko, "Broadband MgB2 Hot-Electron Bolometer THz Mixers Operating up to 20 K," IEEE Trans. on Appl. Supercond. vol.27, artl. no.2300504, 2017.
- 12 S. Krause, V. Mityashkin, S. Antipov, G. Gol'tsman, D. Meledin, V. Desmaris, V. Belitsky, and M. Rudziński, "Reduction of Phonon Escape Time for NbN Hot Electron Bolometers by Using GaN Buffer Layers," IEEE Trans. THz Sci. Technol., vol.7, pp.53–59, 2017.
- 13 D. E. Prober, "Superconducting terahertz mixer using a transition-edge microbolometer," Appl., Phys., Lett., vol.62, 2119, 1993.
- 14 P. J. Burke, R. J. Schoelkopf, and D. E. Prober, "Length scaling of bandwidth and noise in hot-electron superconducting mixers," Appl., Phys., Lett., vol.68, 3344, 1996.
- 15 I. Siddiqi, D. E. Prober, A. Skalare, B. S. Karasik, W. R. McGrath, P. Echternach, and H. G. LeDuc, "Noise and conversion efficiency of aluminum superconducting hot-electron bolometer mixer," IEEE Trans. on Appl. Supercond. vol.11, pp.958–961, 2001.
- 16 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, Nov. 2018.
- 17 Yoshihisa Irimajiri and Akira Kawakami, "Measurements of Receiver Noise Temperature of an Ni-NbN HEBM at 2 THz," Proc. 30th Int. Symp. Space THz Techn., Gothenburg, Sweden, April 15–17, 2019.



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



入交 芳久 (いりまじり よしひさ)

電磁波研究所
リモートセンシング研究室
主任研究員
博士 (理学)
テラヘルツ波送受信機システム開発