

機関番号：82636

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2008～2010

課題番号：20560343

研究課題名(和文) 導波管型準平面ホットエレクトロンボロメータの研究開発

研究課題名(英文) Study on wave-guide quasi-planer hot electron bolometers.

研究代表者

川上 彰 (KAWAKAMI AKIRA)

独立行政法人情報通信研究機構・未来 ICT 研究センターナノ ICT グループ・主任研究員

研究者番号：90359092

研究成果の概要(和文)：

テラヘルツ帯ホットエレクトロンボロメータ(HEB)の中間周波数(IF)の広帯化を目指し、準平面型ナノブリッジ構造、ミキサ特性評価およびSiO₂厚膜基板による導波管型HEBを検討した。ブリッジ幅約450nm、長さ約25nmのナノブリッジ作成プロセスを確立、準光学準平面型HEBミキサを試作し、ミキサ雑音温度、IF帯域幅の評価を行った。導波管型ミキサ作製を目指し、成膜により形成した膜厚20μmのSiO₂基板を形成、同基板の良好な平坦性を確認した。

研究成果の概要(英文)：

To improve the IF bandwidth of hot-electron bolometers (HEB), we have developed fabrication process of quasi-planer nano-bridges. Quasi optical HEB mixers constructed by quasi-planer nano bridges were fabricated and the lengths and widths of nano-bridge were about 450 nm and 25 nm, respectively. The DSB receiver noise temperature and IF bandwidth were evaluated. The SiO₂ film having about 20 μm thickness was deposited as a substrate for waveguide mixers, and good flatness was confirmed.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,400,000	420,000	1,820,000
2009年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2010年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：超伝導エレクトロニクス

科研費の分科・細目：電気電子工学・電子デバイス・電子機器

キーワード：HEB、NbN、エピタキシャル、テラヘルツ、導波管

1. 研究開始当初の背景

近年の異常気象等に伴う地球環境計測や、銀河、星団、惑星系等の天体形成機構の解明を目指す電波天文分野において、テラヘルツ(THz)周波数領域で低雑音動作する受信機の開発が強く望まれている。我々はこの周波数帯における低雑音ヘテロダイン受信機とし

て、エピタキシャル窒化ニオブ(以下NbN)超伝導薄膜を用いたホットエレクトロンボロメータ(以下HEB)の研究開発を行ってきた。これまでに我々が試作した準光学HEBミキサは0.78 THzにおいて受信機雑音温度615 K(DSB)の低雑音特性を達成しており[1]、国外の優れた報告に対しても同程度の性能を

示した。HEBは超伝導SISミキサの性能低下が予想される1.4 THz以上におけるミキサ素子として期待されている。しかし現状のHEBは中間周波数(以下IF)帯域が3 GHz程度と狭く、観測時間の短縮、リアルタイム測定等の面から広帯域化は重要な課題である。また高品質なNbN極薄膜を成膜するためにエピタキシャル薄膜を用いているが、その成長には種結晶として比較的誘電率の高い酸化マグネシウム(以下MgO)単結晶基板が必要であり、導波管型ミキサ化を困難にしている。

本研究課題は我々が開発した窒化チタン(以下TiN)/NbN/MgO多層膜エピタキシャル成長技術を活かし[2]、IF広帯域化及び素子特性再現性の向上を目指している。併せて現在SiO₂厚膜成膜技術を用い、MgO基板上にエピタキシャルNbN-HEBを作成、その後同素子上に基板とする数十μmのSiO₂を成膜、最後にMgO基板を除去し、エピタキシャルNbN-HEBを石英(以下SiO₂)基板に転写することで、導波管型ミキサの実現を目指している。

2. 研究の目的

研究期間内に於いて THz 周波数領域における極低雑音ミキサとしての準平面型 HEB の作成プロセスの確立とその可能性を明らかにする。本研究課題は新素子構造による IF 帯域の広帯域化と素子特性の高再現性の達成、薄膜 SiO₂ 基板上への素子作製手法の検討により、THz 帯 HEB の実用化に向けた研究開発を目的としている。

3. 研究の方法

(1) 準平面型ナノブリッジ構造の作製

常伝導電極としてNbNと格子整合性の良いTiNを用い、準平面ナノブリッジをエピタキシャル多層膜で構成する作製プロセスを検討、その直流特性等評価を行った。

(2) 準平面型NbN-HEBの特性評価と導波管型HEBミキサの検討

THz帯ミキサ雑音温度評価、IF帯域評価および導波管型ミキサの検討としてSiO₂厚膜基板の評価を実施した。

(3) 中赤外光ナノアンテナの検討

本来HEBはその動作原理から周波数依存性を持たない。即ち微細化により微小アンテナおよび検出器を作成できれば、中赤外領域の検出器として活用できると考えている。本研究の展開として、光ナノアンテナを用いた中赤外検出器の検討を行った。

4. 研究成果

(1) 準平面型ナノブリッジ構造の作製

NbNブリッジ構造によるHEBは、テラヘルツ帯で優れた受信機特性を示しているが、そのIF帯域幅は現状では3 GHz程度に留まり、他のサブミリ波帯ミキサに比べて十分な値ではない。一対策としてブリッジをナノサイズに極小化して、ホットエレクトロンをごく短時間で電極へ拡散させることが考えられている。極めて短いブリッジを作成できれば、IF帯域を格段と向上できると考えられている(例えば長さ100 nmのアルミニウムブリッジの場合、予想IF帯域は160 GHz)[3]。そこで数十 nm のブリッジ長を有するナノブリッジを安定に作製できる準平面型 NbN-HEB を検討した。常伝導電極として NbN と格子整合性の良い TiN を用い、全てエピタキシャル多層膜で構成する準平面型 NbN ナノブリッジ作製プロセスを開発、特性評価を行った。

図1に準平面型 NbN ナノブリッジの概略図を示す。ここでブリッジ長は両電極間の MgO 膜厚により規定でき、通常の光リソグラフィでは困難な数十 nm 以下のブリッジを安定して作製することができる。図2に作製し

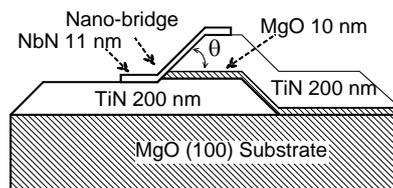
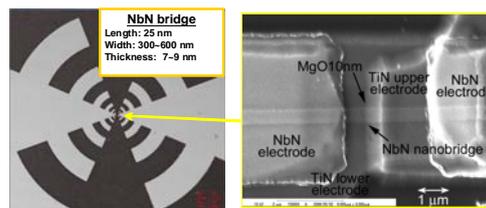
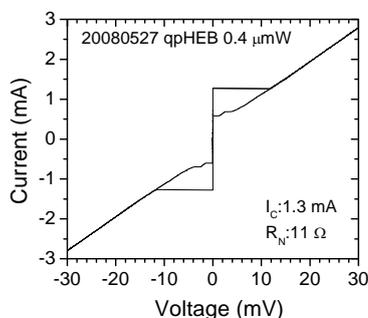


図1 準平面型 NbN ナノブリッジの概略図



(a)



(b)

図2 準平面型 NbN ナノブリッジの SEM 像(a)と電流-電圧特性(b)

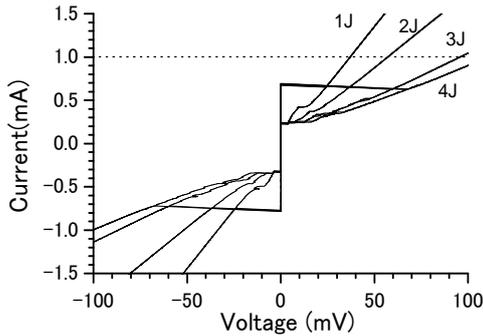


図3 電極面積を微小化した準平面型ナノブリッジの電流-電圧特性

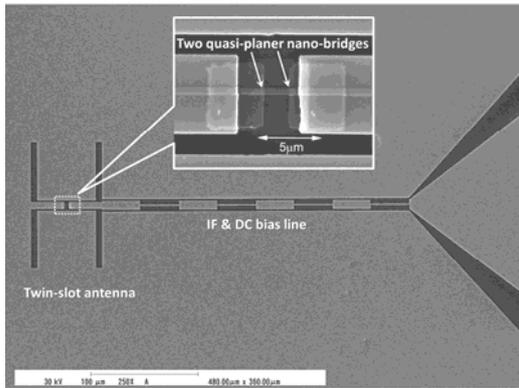
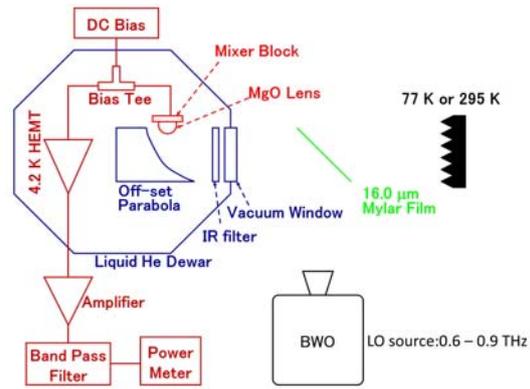


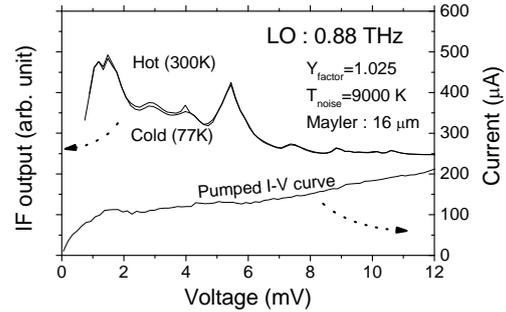
図4 準光学準平面型 NbN-HEB の電子顕微鏡写真

た準平面型 NbN-ナノブリッジの SEM 像(a)を示す。SEM 像からブリッジ幅は約 450 nm、また TiN 上部電極膜厚 200 nm と TiN 傾斜部の幅から、角度 θ は約 25 degree と見積もられた。また同時に角度 θ および層間 MgO 膜厚からブリッジ長は約 25 nm と考えられる。NbN ナノブリッジの転移温度を測定したところ約 12.1K の良好な超伝導特性を示した。既に電極に NbN を用いた場合、全ての薄膜がエピタキシャル成長することは確認しており[4]、同様に今回のブリッジも構成する TiN、MgO、NbN 各薄膜が相互にエピタキシャル成長していると考えられる。図 2(b)に典型的な電流-電圧特性を示す。臨界電流 1.3 mA に対して素子抵抗 $R_N=11 \Omega$ であった。ブリッジ幅 0.3 ~ 0.6 μm の NbN ナノブリッジにおいて R_N は 5~40 Ω が得られ、準平面型エピタキシャル NbN-HEB 作製プロセスを確立することができた。

しかし電極構造に起因する寄生容量成分が約 50 fF と大きく、THz 帯でのミキサ応用において問題であった。そこで電極面積の縮小及び層間絶縁 MgO 薄膜の増加により、同容量を約 1/10 である約 5 fF まで低減させることを試みた。試作したナノブリッジは上部 TiN 電極をブリッジ幅でエッチングし、その



(a) ミキサ雑音評価系



(b) 雑音特性

図5 THz 帯ミキサ雑音評価系(a)と雑音特性評価(b)

面積をこれまでの 1/5 である約 $0.6 \times 2 \mu\text{m}^2$ まで微小化、また層間 MgO 膜厚を 2 倍(20 nm)にすることで、対向電極部の静電容量の軽減を図った。図 3 に対向電極を微小化した準平面 NbN ナノブリッジの I-V 特性を示す。測定したナノブリッジは 4 接合までの直列特性を重ねて表示している。ナノブリッジ長約 50 nm、幅 0.6 μm 、臨界電流約 0.7 mA、一個当たりの素子抵抗約 30 Ω で、臨界電流、素子抵抗共に良好な特性を示した。

(2) 準平面型 NbN-HEB の特性評価と導波管型 HEB ミキサの検討

TiN 電極の対向面積を微小化した NbN ナノブリッジを用い、2 直列化した準平面型 HEB を試作、880 GHz におけるミキサ雑音評価を試みた。図 4 に作成した準光学準平面型 NbN-HEB の顕微鏡写真を示す。試作したミキサは 2 直列の準平面型 NbN ナノブリッジと、twin-slot アンテナ他から構成されている。図 5 にミキサ雑音温度評価に用いた THz 帯雑音温度評価系と、77K/300K 熱源に対する IF 応答特性を示す。測定した雑音特性は十分な応答が得られず、約 9000 K (DSB) に留まった。そこで測定した準平面型 HEB を電子顕微鏡観察したところ、コプラナー線路を構成する Al 線路が片方のナノブリッジ下部電

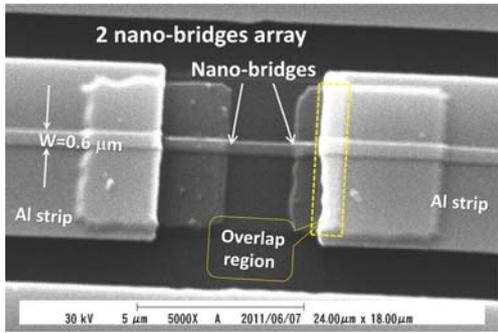
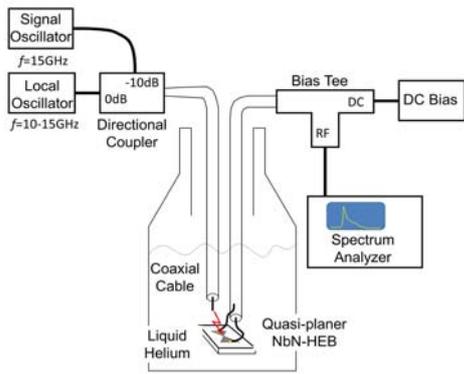


図 6 電極対向面積の増大



(a) IF 帯域評価測定系

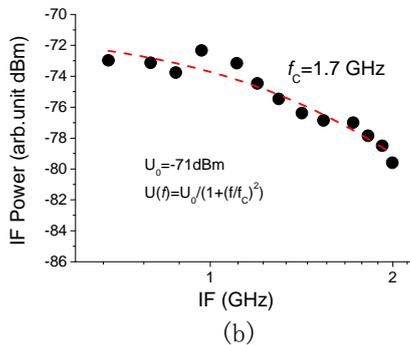


図 7 20 GHz 帯 IF 特性評価系(a)と IF 帯域測定結果(b)

極と重なっていることを確認した。このことが対向面積を増大、即ち寄生容量が増大し多と考えられる(図 6 参照)。今後さらに素子作成精度を向上させ、特性の向上を進める。

次に IF 特性評価と導波管型ミキサ作製の検討を行った。図 7 に IF 評価システム(a)と IF 帯域測定結果(b)を示す。従来線用デュアーにて IF 帯域評価を実施していたが、今回新たに簡便な測定系を構築、測定棒で容易に評価できる 20 GHz 帯 IF 特性評価系を構築した。測定した準平面型 NbN-HEB は 2 直列のナノブリッジによる準平面型 NbN-HEB である。結果として約 1.7 GHz のカットオフ周波数を測定したが、今後ブリッジ長、ブリッジ膜厚等による IF 帯域依存性を明確にする。

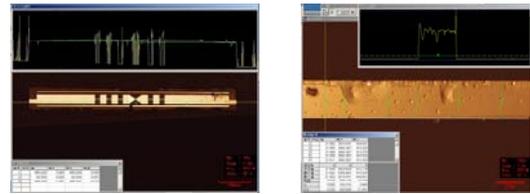


図 8 導波管型ミキサにおける SiO₂ 基板のそりと基板厚の評価

本研究において検討している準平面型 NbN-HEB は、単結晶 MgO 基板を用いエピタキシャル多層膜で構成している。このことにより超伝導特性の高品質化と優れた再現性を確保しているが、従来多く用いられてきた SiO₂ 基板に比べ MgO 基板は比較的高い誘電率を有し、導波管型ミキサの作成を困難なものにしてきた。そこで今回、MgO 基板上に導波管型ミキサ素子を作製し、その後、同素子上に基板とする 20 μm の SiO₂ を成膜、最後に MgO 基板を酸で除去する方法で、SiO₂ 基板上にエピタキシャル NbN 導波管型ミキサの形成を試みた。

SiO₂ は rf スパッタリング装置を用いて成膜している。SiO₂ 基板のそりと厚さをレーザー顕微鏡により評価した結果、長さ 1mm のスキャン領域に対し、基板の中央部の盛り上がりは約 0.7 μm、また基板厚は設定厚さ 20.2 μm に対し誤差+6%で作成できることを確認した(図 8 参照)。今後、導波管型準平面 NbN-HEB の作製および評価系整備を進める。

(3) 中赤外光ナノアンテナの検討

HEBはその動作原理から周波数依存性を持たず、微小化により遠赤外のみならず、中・近赤外領域の検出器としても期待することができる。そこで光-検出器結合方式であるアンテナ構造の微小化を試み、NbN-HEBの中赤外検出器への展開を検討した。

中赤外領域でのアンテナ構築にはナノサイズの微細構造作成技術が必要である。そこで全リソグラフィに電子線描画を用い、また低ダメージで耐フッ素性の高いイオンビームスパッタ MgO 薄膜とエッチング加工精度の高い 200nm 程度の NbN 薄膜を無機レジストとして用いた作成プロセスを考案した。図 9 に素子の顕微鏡写真及び概略図を示す。作製したナノアンテナは、長さ 2400 nm、幅 450 nm、厚さ 100nm の Al 薄膜ダイポールアンテナで、このアンテナ中心部に幅 450 nm、長さ約 150 nm、膜厚 6 nm の NbN 薄膜ブリッジ(負荷抵抗約 60 Ω)を結合させた。ナノアンテナ特性評価には近赤外フーリエ変換赤外分光光度計(FTIR)を使用した。アン

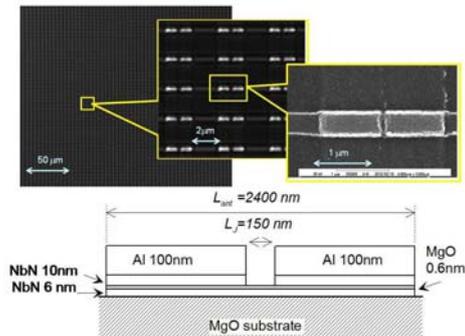


図9 ナノアンテナ顕微鏡写真と概略図

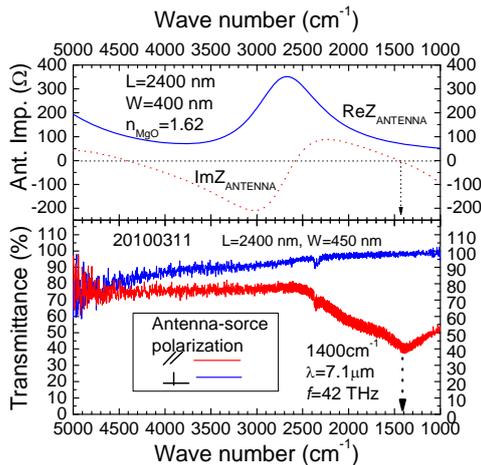


図10 アンテナインピーダンスの計算と FTIR 透過率測定

テナインピーダンスと負荷抵抗が整合した場合、入射光を効率良く熱に変換することから、FTIR で透過率を測定した場合、アンテナ特性は吸収特性として現れると考えた。ここで有意な吸収特性を得るために MgO 単結晶基板の中心 $1\text{mm} \times 1\text{mm}$ の領域内全面に、縦 $2.5\ \mu\text{m}$ 横 $4.5\ \mu\text{m}$ 間隔でナノアンテナを配置した。今回 FTIR 測定は全て室温にて実施している。またナノアンテナ設計・計算には電磁界シミュレータ sonnet を用いた。

図 10 に MgO 屈折率に $\lambda=5.35\ \mu\text{m}$ における報告値 $n=1.62$ [5] を用いた場合のアンテナインピーダンスの計算結果と、FTIR 透過率測定結果を示す。測定結果より波数 1400cm^{-1} ($42\ \text{THz}$) 付近で、アンテナと一致した偏光方向の透過率特性において明瞭な吸収特性が観測された。また計算結果から同波数付近で NbN 薄膜負荷設定値 ($60\ \Omega$) との整合が予想される。また波数依存性もアンテナ - 負荷間のインピーダンス整合で定性的に表現できることを確認しており、同吸収はナノアンテナ構造によると考えている。

次にアンテナ給電部にある NbN 薄膜ブリッジ部の超伝導特性の測定を行った。図 11 に超伝導特性評価用素子 SEM 像と I-V 特性を

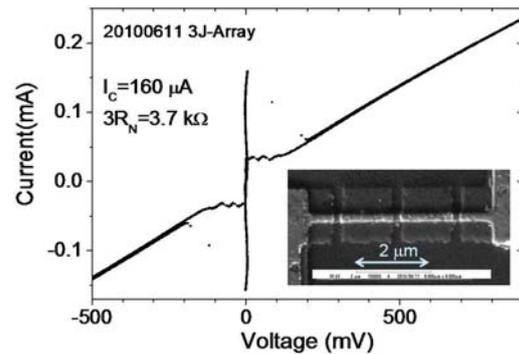


図 11 給電部超伝導薄膜ブリッジの SEM 写真と I-V 特性

示す。測定した素子は負荷抵抗(NbN 薄膜ブリッジ、膜厚 $6\ \text{nm}$ 、長さ約 $200\ \text{nm}$ 、幅 $200\ \text{nm}$) を有するナノアンテナの 3 直列である。I-V 特性から臨界電流は約 $160\ \mu\text{A}$ を示し、また超伝導転移温度は $12.2\ \text{K}$ が得られ、膜厚 $6\ \text{nm}$ として良好な値を示した。今後、NbN-HEB を基にした中赤外光検出器の研究・開発を進める。

参考文献

- [1] H. Kataoka, et al, IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 15, pp. 469-, 2005.
- [2] A. Kawakami, et al, IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 15, pp. 984-, 2005.
- [3] B. S. Karasik, et al, IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 9, pp. 4213-, 1999.
- [4] 川上彰、他、第 55 回応用物理学関係連合講演会 28a-ZA-4、日本大学、2008 年
- [5] R. E. Stephens, et al, J. Res. Nat. Bur. Stand., vol. 49, pp. 249-252, Oct. 1952.

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. A. Kawakami, “Fabrication of Nano-Antennas for Superconducting Infrared Detectors,” IEEE Trans. Appl. Supercond., Volume 21, pp632-635, 2011.

[学会発表] (計 5 件)

1. 川上彰、ナノアンテナ結合型超伝導近赤外光検出器の評価、第 71 回応用物理学学会学術講演会、2010 年 9 月 16 日、長崎大学(長崎)
2. A. Kawakami, Fabrication of Nano-antennas for Superconducting Infrared Detector, Applied Superconductivity Conference, August 5, 2010, Omni Shoreham Hotel, Washington, D.C., USA

3. 川上彰、ナノアンテナ結合型超伝導近赤外光検出器の検討、第 57 回応用物理学関係連合講演会、2010 年 3 月 19 日、東海大学(神奈川)
4. 川上彰、準光学エピタキシャル NbN/MgO/NbN SIS ミキサの設計、第 70 回応用物理学学会学術講演会、2009 年 9 月 8 日、富山大学(富山)
5. 川上彰、準平面型ナノブリッジによる NbN ホットエレクトロンボロメータの検討、第 69 回応用物理学学会学術講演会、2008 年 9 月 3 日、中部大学(愛知)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

川上 彰 (KAWAKAMI AKIRA)

情報通信研究機構・未来 ICT 研究センター
ナノ ICT グループ・主任研究員

研究者番号：90359092

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：