

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 19 日現在

機関番号：82636

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2015

課題番号：25630156

研究課題名(和文) 室温熱輻射から微弱電力を抽出するための分布定数型MIMトンネルダイオードの研究

研究課題名(英文) A study of the distributed MIM tunnel diode for extracting a weak power from the room-temperature thermal radiation

研究代表者

川上 彰 (Kawakami, Akira)

国立研究開発法人情報通信研究機構・未来ICT研究所ナノICT研究室・主任研究員

研究者番号：90359092

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：中赤外光を直接整流して電力抽出を行う光レクテナの開発を目指し、マイクロストリップ線路および分布定数型Metal-Insulator-Metal (MIM)トンネルダイオードの研究を行った。電子線描画装置を用いた金属薄膜の微細加工プロセスを開発し、中赤外光領域におけるマイクロストリップ共振器を作製した。分光器を用いて共振器を評価することで、中赤外光領域におけるマイクロストリップ線路の位相定数の評価を行った。更にMIMダイオードの試作を行い、正負非対称の非線形特性を観察した。

研究成果の概要(英文)：To develop the mid-infrared rectenna, the mid-infrared microstrip line and the distributed Metal-Insulator-Metal (MIM) tunnel diode were studied. First, a micro-fabrication process of a metal thin film using an electron beam lithography system was developed to fabricate microstrip resonators. By the evaluation of the resonators using a spectrometer, the phase velocity of the mid-infrared microstrip line was estimated. Further the MIM diodes were fabricated, and the non-linear characteristics of the diodes were observed.

研究分野：超伝導エレクトロニクス

キーワード：中赤外 アンテナ MIMダイオード マイクロストリップ

1. 研究開始当初の背景

平成 24 年度から基盤研究 B「極限的微小加工技術による高速化・高効率化を目指したナノアンテナ結合型赤外検出器」により、中赤外光の電磁波を捉える“中赤外光ナノアンテナ構造”の構築及びその特性評価を実施、既にアンテナ長 $2.4 \mu\text{m}$ のダイポールアンテナ型中赤外光ナノアンテナを作製し、同アンテナが空間波長 $7 \mu\text{m}$ の中赤外光に対して、電磁界シミュレータと一致したアンテナ動作を確認、中赤外波長領域におけるアンテナ設計が可能であることを報告していた。このことは光マイクロストリップ伝送線路構築も可能であることを示唆し、同線路及びインピーダンス整合器など中赤外光受動素子の検討を開始していた。このような背景から 300 K 熱輻射のピーク強度を示す波長 $10 \mu\text{m}$ (30 THz) 付近の電磁波を整流ができる“整流器”が実現できた場合、開発中の中赤外光アンテナ、インピーダンス整合器などと組み合わせることで、微弱ながら室温環境において常に電力を発生する、中赤外光微弱電力抽出技術が可能であると考え、本研究課題を提案した。

2. 研究の目的

中赤外領域において動作可能な分布定数型 Metal-Insulator-Metal (MIM) トンネルダイオードの研究・開発を行い、中赤外領域における光検出器開発を目指して研究開発を進めている中赤外光ナノアンテナ構造と組み合わせることで、300 K 放射である中赤外光 (30 THz 前後) から微弱電力を抽出するための要素技術を検討する。中赤外光ナノアンテナ構造により中赤外電磁波を取出し、光マイクロストリップインピーダンス整合を介して分布定数型 MIM トンネルダイオードに伝達、同ダイオードにより整流することで、直流電力の抽出を達成する、いわゆる中赤外光レクテナを最終目的としている。極微弱な消費電力で動作可能で交換困難な心臓ペースメーカー、大量配置を可能とするワイヤレスネットワーク等の電源への展開を目指す。

3. 研究の方法

本研究は研究期間内に於いて、波長 $10 \mu\text{m}$ の中赤外光を整流する分布定数型 MIM トンネルダイオードの設計、試作およびその特性評価を行う。具体的には以下の項目について研究を進める。

(1) 分布定数型 MIM トンネルダイオードの作成プロセスの検討および直流特性評価

電子線描画を全リソグラフィプロセスに導入し、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 薄膜を無機レジストとして用いた分布定数型 MIM トンネルダイオード作成プロセスを確立する。

(2) 分布定数型 MIM トンネルダイオードをもちいた中赤外光レクテナの設計・試作

中赤外光から電力を抽出する“光レクテナ”を設計・試作、基礎的特性評価を行う。計算機シミュレーションとの比較のもと、光ナノアンテナ、分布定数インピーダンス整合器、分布定数 MIM トンネルダイオードの設計最適化を検討する。

4. 研究成果

(1) 分布定数型 MIM トンネルダイオード作製のための微小加工プロセスの検討

本研究は、分布定数型 Metal-Insulator-Metal (MIM) トンネルダイオードの研究を行い、この中赤外光アンテナ構造と組み合わせることで、室温 300 K 放射からの微弱電力の抽出を目指している。

同ダイオードは仕事関数が異なる二種類の金属で 1 nm 程度のトンネルバリアを挟んだ構造で、比較的大きな寄生容量が存在する。その結果として集中定数型ダイオードでは高周波的に短絡してしまい、中赤外電磁波に対する応答・整流は不可能である。そこで本研究ではトンネル構造を分布定数線路と見なした分布定数型線路ダイオードを想定している。図 1 にその概略図を示す。

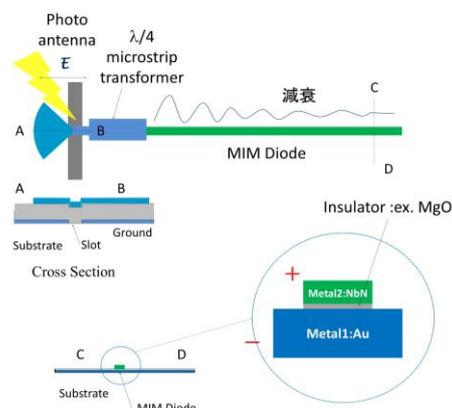


図 1 本研究が想定する分布定数型線路ダイオードによる中赤外光レクテナ

この場合においても極薄いトンネルバリア(約 1 nm)のために分布定数型 MIM トンネルダイオードの線路特性インピーダンスは必然的に低くなる。その為線路幅を極力狭くして、入力インピーダンスを確保する必要がある。そこで研究当初より、全てのリソグラフィ工程に電子線描画を用いた新たな作製プロセスの検討を行った。

通常の電子線描画用レジストは耐プラズマ性が不十分なため、直接極細線加工への導入は困難であった。そこでレジストへのダメージが少ないイオンビームスパッタ法による酸化マグネシウム(MgO)極薄膜(膜厚 1 nm)を用い、リフトオフ法で電子線レジストパターンを MgO 極薄膜に転写、無機レジストとして使用する新たなパターンニングプロセス

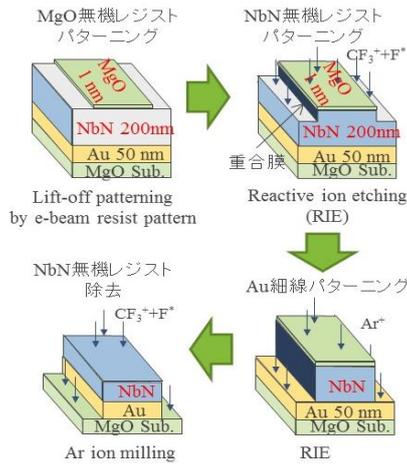


図2 金細線パターニングプロセス

を考案した。MgOは耐フッ素ラジカル耐性が極めて高く、四フッ化炭素による反応性エッチングにおいて、膜厚1 nmのMgO無機レジストで、膜厚200 nmのNbN薄膜を幅100 nmのラインにエッチングすることが可能である。このNbN薄膜をさらにレジストとして用いることで、反応性イオンエッチング(RIE)では困難な金属薄膜などの微細加工が可能になった。図2に同方法による金(Au)細線加工のプロセス概要を示す。

図3に同プロセスを用いて試作した、ダイポールアンテナ付中赤外光検出器の顕微鏡写真を示す。ここではアルミニウム(Al)薄膜(膜厚50 nm)の微細加工を行っているが、線幅約200 nmの直流バイアスライン形成に成功している。

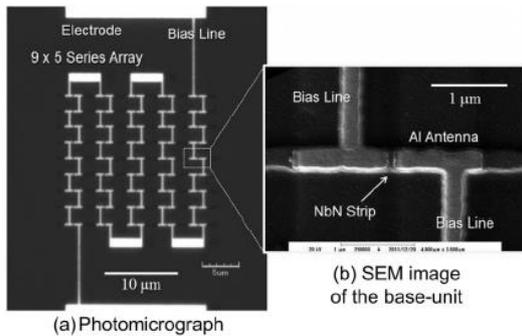


図3 試作したAlダイポールアンテナ付中赤外光検出器

(2) 中赤外光マイクロストリップ線路の位相定数評価

本研究課題において、中赤外光領域での分布定数回路設計手法の確立は重要である。MIMトンネルダイオードを分布定数線路として設計し、同線路への入力インピーダンスと光アンテナインピーダンスとの整合を確保する整合回路も、分布定数回路で構成する。そこで中赤外光領域における分布定数回路構築の基板技術となるマイクロストリップ線路の位相定数評価を試みた。

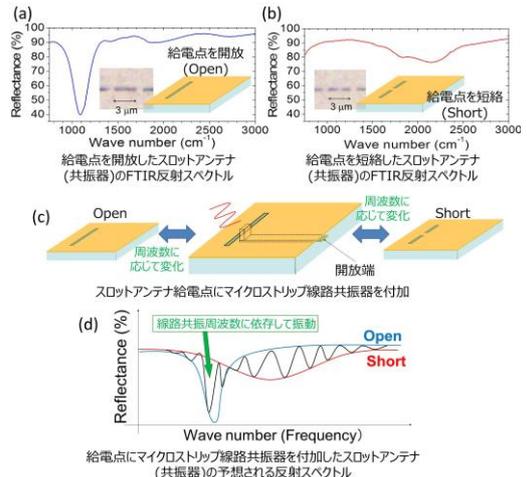


図4 マイクロストリップ線路共振器を付加したスロットアンテナの動作

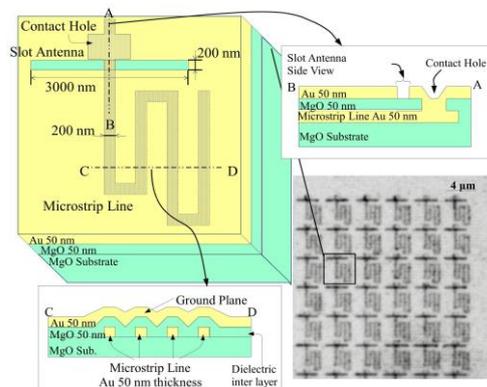


図5 作製した線路共振器付スロットアンテナ

今回、スロットアンテナ給電点にマイクロストリップ線路共振器を接続させ、その吸収スペクトルから位相定数の評価を試みた。まず給電点を開放および短絡したスロットアンテナの反射スペクトル測定結果を図4(a)、(b)に示す。ここでアンテナ長及び幅はそれぞれ3000 nm、200 nm、膜厚50 nmのAu薄膜で作製している。この場合、アンテナは共振器として働き、入射した光は共振器により再放射、その多くはFTIR検出器に戻らないため、共振特性は吸収特性として現れる。給電点開放時は波数約1100 cm⁻¹(33 THz)に、短絡時は2100 cm⁻¹(63 THz)付近に共振特性を確認できる。次にスロットアンテナ給電点に線路内波長より充分長いマイクロストリップ線路共振器を付加した場合、共振器は周期的に“開放”、“短絡”を繰り返す“スイッチ”として働き(図4(c)参照)、(a)と(b)の特性を繰り返す(d)の特性が観察できると考えた。この振動特性の周期は線路位相定数に起因するので、FTIRにより線路共振器付スロットアンテナの反射率を測定することで、マイクロストリップ線路の位相定数を評価できると考えた。

図5に作製した線路共振器付スロットアンテナを示す。まず単結晶MgO基板上にマイクロストリップ線路を膜厚50 nmのAu薄膜

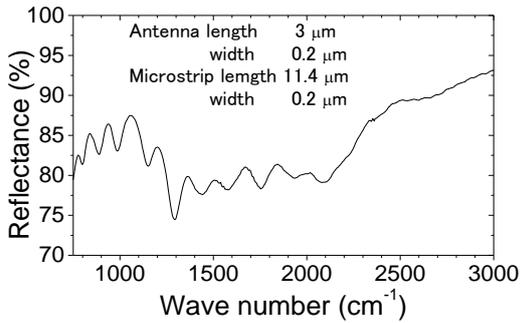


図6 マイクロストリップ線路共振器付スロットアンテナのFTIR反射スペクトル

で作製、線路長及び幅は11.4 μm、200 nmとした。次に誘電体層として50 nmのMgO薄膜を成膜、その上に接地面を兼ねたスロットアンテナを膜厚50 nmのAu薄膜で作製している。ここでスロットアンテナ長、幅は各々3000 nm、200 nmである。図6に同素子のFTIR反射スペクトルを示す。波数900~2200 cm⁻¹の領域において、周期的な吸収特性を確認できる。このことは中赤外光領域においてもマイクロストリップ線路が共振器として動作していることを示しており、この共振特性から51 THzにおける同線路の位相定数をβ=2.6 rad/μmと見積もった。これらの結果を基に、中赤外光レクテナにおける分布定数回路設計を行っている。

(3) 分布定数型 MIM トンネルダイオードを用いた中赤外光レクテナの設計・試作

本研究課題で想定している MIM ダイオードは、仕事関数が異なる二種類の金属でトンネルバリアを挟んだ構造を有する。そこで従来から超伝導トンネル接合の作製技術を基にプロセスへの導入を考慮して、当初、二種類の金属として、加工が容易なニオブ(Nb: 仕事関数4.3 eV)と窒化チタン(TiN: 仕事関数5.1 eV)を用いた MIM トンネルダイオードの作製を試みた。ここでトンネルバリアとしては酸化マグネシウム(MgO: 膜厚0.75 nm)極薄膜を用いた。対向面を有するトンネルダイオードは大きな寄生容量を有するが、ここでは非線形性の確認に注力して、一般的なフォトリソグラフィを用いた素子作製を行った。図7に作製した MIM ダイオードの電流-電圧

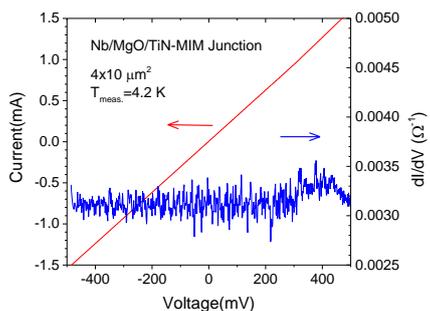


図7 Nb/MgO/TiN-MIM ダイオードの電流-電圧特性

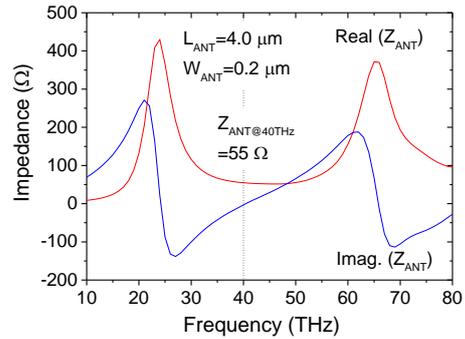
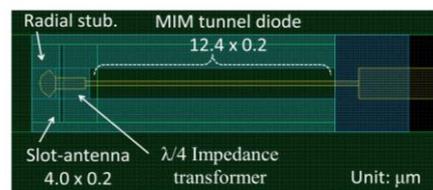


図8 中赤外レクテナ用スロットアンテナのアンテナインピーダンスの周波数依存性

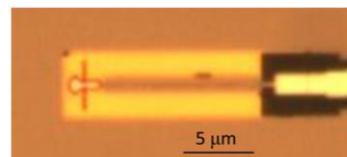
特性を示す。ダイオード面積は4×10 μm²で電流-電圧特性上に重畳する電極抵抗を抑えるため4.2 Kで測定している。その微分特性から、正負非対称の特性を確認したが、その非線形性は明瞭でなく、MIM ダイオードの両電極間の絶縁が不十分であったと考えている。

次に MIM トンネルダイオードを用いた中赤外光レクテナの設計を進めた。既に中赤外光ナノアンテナ構造の設計手法を獲得しており、今回は40 THz(λ=7.5 μm)での動作を想定し、スロットアンテナ長4.0 μm、幅0.2 μmとした。同アンテナインピーダンスの計算値を図8に示す。設計周波数である40 THzにおいて虚数成分はほぼゼロとなり、アンテナインピーダンスZ_{ANT}は55 Ωである。

図9に中赤外光レクテナの設計図と素子顕微鏡写真を示す。今回、アンテナおよび分布定数型 MIM トンネルダイオードの下部電極を膜厚50 nmのAu(仕事関数5.1 eV)薄膜で形成し、アンテナからの入射エネルギーを伝達するマイクロストリップ上部電極は、比較的作製が容易なAu/NbN(仕事関数4.7-4.9 eV)二層膜とした。ここで MIM 分布定数型トンネルダイオードの上部電極幅W_{MIM}は0.2 μm、長さL_{MIM}は、伝達した中赤外光エネルギーをトンネリングにより減衰させるため、線路内波長の2.7倍の12.4 μmとした。またトンネルバリアとして膜厚0.8-1 nmのMgO極薄膜を用いた。図9に MIM 分布定数型トンネルダイオード(L_{MIM}=3.1、12.4 μm)の入力インピーダンスZ_{MIM}計算値を示す。L_{MIM}=3.1では反



(a) 中赤外光レクテナ素子設計



(b) 素子光学顕微鏡写真

図9 中赤外光レクテナの設計図と顕微鏡写真

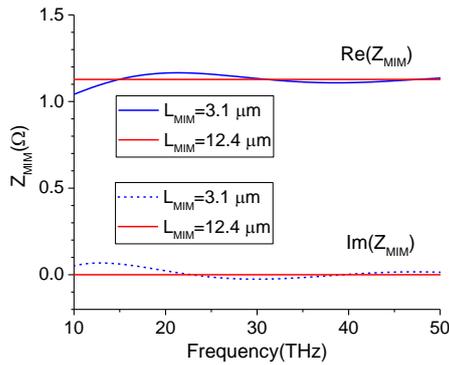


図 10 MIM 分布定数ダイオード
入力インピーダンスの周波数依存性

射波による共振特性が見られるが、 $L_{\text{MIM}}=12.4 \mu\text{m}$ においては周波数に無依存の約 1.1Ω を示した。これは往復反射における入力信号のトンネリングによる減衰と共に、電極金属の抵抗損の影響が大きい。このことは中赤外光領域で動作する分布定数型 MIM トンネルダイオードの電極金属の選定には、仕事関数のほかに低損失材料の選択が重要であることを示唆している。スロットアンテナ Z_{ANT} と Z_{MIM} とはマイクロストリップ $\lambda/4$ 整合器を介して接続されている。

今回試作した分布定数型 MIM トンネルダイオードの電流—電圧特性の評価も行ったが、正負非対称性、非線形特性は確認できなかった。原因の一つとして上下電極間の絶縁不良を考えており、電極材料の最適化と共に作製プロセスの再検討を進める。

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 4 件)

- ① J. Horikawa, A. Kawakami, M. Hyodo, S. Tanaka, M. Takeda, H. Shimakage, “Design of Mid-Infrared Superconducting Detector with Phased Array Nano Slot Antenna”, IEEE Trans. Appl. Supercond., 25, Issue 3, (2015), 査読有
- ② A. Kawakami, J. Horikawa, M. Hyodo, S. Tanaka, M. Takeda, H. Shimakage, “Fabrication of Superconducting Mid-infrared Photo-detectors with Dipole Nano-antennas” IEEE Trans. Appl. Supercond., 25, Issue 3, (2015), 査読有
- ③ 川上 彰、堀川隼世、兵頭政春、田中秀吉、武田正典、島影 尚、“ナノアンテナを用いた超伝導中赤外光検出器の検討”、SCE2014-52、114、19-24 (2015)、査読無
- ④ J. Horikawa, A. Kawakami, M. Hyodo, S. Tanaka, M. Takeda, H. Shimakage: “Evaluation of nano slot antenna for Mid-infrared detectors”, Infrared Physics & Technology, 67, 21-24 (2014), 査読有.

[学会発表] (計 9 件)

- ① 川上 彰、堀川隼世、兵頭政春、田中秀吉、武田正典、島影 尚、“ナノアンテナを用いた超伝導中赤外光検出器の光応答特性”、第 63 回応用物理学会春季学術講演会、21a-W833-8、2016 年 3 月、東京工業大学大岡山(東京都・目黒区)
- ② 川上 彰、島影 尚、堀川隼世、兵頭政春、田中秀吉、“ツインスロットアンテナ付超伝導中赤外光検出器の応答特性”、第 76 回応用物理学会春季学術講演会、14p-4A-23、2015 年 9 月、名古屋国際会議場(愛知県・名古屋市)
- ③ 川上 彰、“ナノアンテナ技術による中赤外光検出器の高速・高機能化”メタマテリアル第 187 委員会、平成 27 年度第 2 回研究会、2015 年 9 月、機械振興会館(東京都・港区)
- ④ 川上 彰、堀川隼世、兵頭政春、田中秀吉、武田正典、島影 尚、“中赤外マイクロストリップ線路の位相定数評価”、第 62 回応用物理学会春季学術講演会、13a-A14-12、2015 年 3 月、東海大学(神奈川県・平塚市)
- ⑤ 川上 彰、堀川隼世、兵頭政春、田中秀吉、武田正典、島影 尚、“ナノアンテナを用いた超伝導中赤外光検出器の検討”、電子情報通信学会超伝導エレクトロニクス研究会(SCE)、2015 年 1 月、機械振興会館(東京都・港区)
- ⑥ 堀川隼世、川上 彰、兵頭政春、田中秀吉、武田正典、島影 尚、“ナノダイポールアンテナを用いた超伝導中赤外光検出器の検討”、第 75 回応用物理学会秋季学術講演会、20a-A22-1、2014 年 9 月、北海道大学(北海道・札幌市)
- ⑦ J. Horikawa, A. Kawakami, M. Hyodo, S. Tanaka, M. Takeda, H. Shimakage, “Design of Mid-Infrared Superconducting Detector with Phased Array Nano Slot Antenna”, Applied Superconductivity Conference 2014, 2014 年 8 月 10-15 日、シャーロット市 (米国)
- ⑧ A. Kawakami, J. Horikawa, M. Hyodo, S. Tanaka, M. Takeda, H. Shimakage, “Fabrication of Superconducting Mid-infrared Photo-detectors with Dipole Nano-antennas”, Applied Superconductivity Conference 2014, 2014 年 8 月 10-15 日、シャーロット市 (米国)
- ⑨ 堀川隼世、川上 彰、兵頭政春、田中秀吉、武田正典、島影 尚、“ナノスロットアンテナを用いた超伝導中赤外光検出器の検討”、第 61 回応用物理学会春季学術講演会、18a-D5-6、2014 年 3 月 18 日、青山学院大学相模原キャンパス(神奈川県・相模原市)

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況（計 0件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

○取得状況（計 0件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

川上 彰 (KAWAKAMI AKIRA)
国立研究開発法人情報通信研究機構・未来
ICT 研究所ナノ ICT 研究室・主任研究員
研究者番号：90359092