

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 23 日現在

機関番号：82636

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24360142

研究課題名(和文) 極限的微細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

研究課題名(英文) Nano-antenna coupling type infrared detectors with the aim of high speed and high efficiency using ultra-fine processing technology

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) 14,500,000円

研究成果の概要(和文)：赤外光検出器の応答特性および機能向上を目的として、我々は光ナノアンテナを提案している。赤外光アンテナの設計指針獲得の目的でナノスロットアンテナを試作、その特性評価を行った。アンテナの中赤外反射スペクトルにおいて、アンテナ動作に起因する明瞭な吸収特性を観察した。また異常表皮効果を考慮することで、電磁界シミュレータによりアンテナ設計が可能であることを示した。アンテナの実効面積評価も行い、54 THz において $3.5 \mu\text{m}^2$ を得た。アンテナ給電点に超伝導ストリップを有する中赤外光検出器を試作し、波長 $4.9 \mu\text{m}$ の中赤外光に対する応答特性を測定、アンテナ動作に起因する明確な偏波面依存性を確認した。

研究成果の概要(英文)：We have proposed using nano-antennas with superconducting detector to improve the response performance of infrared detectors. For the construction of design guide of infrared antenna, nano-slot antennas were fabricated and evaluated. Through measurements of the spectral reflectance characteristics, clear absorptions caused by the antenna properties were observed in the infrared region. By considering the abnormal skin effect, we showed that it is possible to design antennas in the infrared region by using an electromagnetic simulator. The effective area of the antenna was also evaluated and was found to be approximately $3.5 \mu\text{m}^2$ at 54 THz. We have fabricated prototype of mid-infrared photo-detectors which were formed with 45 dipole-antennas with an NbN strip. By the irradiation of mid-infrared ($\approx 4.9 \mu\text{m}$) light, the responses with high polarization dependencies caused by antenna effect were observed.

研究分野：超伝導エレクトロニクス

キーワード：ナノアンテナ 赤外光 検出器 窒化ニオブ FTIR

1. 研究開始当初の背景

超伝導ナノワイヤ単一光子検出器や超伝導転移端センサなど超伝導近赤外光検出器は、高量子効率・時間分解能・低暗係数率などで、既に従来の半導体検出器を凌駕する性能を示している。しかし従来の多くの光検出器と同様に受光機構と検出機構が一体で、寄生容量・インダクタンスにより現構造では飛躍的な応答速度の向上は困難と考えている。一方従来から我々は、テラヘルツ周波数帯における極低雑音電磁波受信機として、超伝導ホットエレクトロンボロメータミキサの研究開発を進めてきた。同ミキサは空間からの電磁波を効率良く受信する平面アンテナと、その給電点に配置した超伝導窒化ニオブ(NbN)微小極薄膜ストリップによる微小検出部から構成され、アンテナと検出部とのインピーダンス整合を確保することで、受信面積・高感度特性の確保と2 GHzを超える高速応答動作を実現してきた。そこで赤外光検出器においても受光機構と検出機構とを“光アンテナ”と“微小検出器”に分け、各々最適化を施すことにより、赤外光検出器の更なる高速化・高効率化が可能であると考えた。

2. 研究の目的

新たな光-検出器結合方式として光ナノアンテナ構造を提案、従来一体であった光結合機構と検出器とをナノアンテナと微小検出器に分けることで、ナノアンテナによる受光面積の確保と検出器微細化による応答速度の向上を達成し、中赤外から近赤外領域に於ける光検出器の高速化・高効率化を目指す。ナノアンテナのインピーダンス特性等評価にはフーリエ変換赤外分光光度計(FTIR)を用い、赤外光アンテナの設計指針を確立する。また超伝導赤外光検出器の素子構造および素子駆動・信号検出方法を検討し、ナノ微細加工技術の最適化と共に光の波長程度の素子構造作製プロセスを確立する。最後に中赤外光検出器の試作・特性評価を行い、光-検出器結合方式としてのナノアンテナの優位性を明確にする。

3. 研究の方法

本研究課題は光-検出器結合機構をナノアンテナと微小検出器とに分けることで、各々の最適化を実施し、ナノアンテナによる受光面積の確保と、検出器の微細化による応答速度の向上を目指している。そこで研究実施に際し、研究内容を“ナノアンテナ特性評価/設計指針の確立”、“赤外光検出器作製プロセスの確立”、“赤外検出器評価系の整備”の3項目に分け、各々研究分担者との密なる研究協力のもと、並行して研究の実施を図った。具体的には以下の研究項目について研究を進めた。

(1) ナノアンテナ特性評価/設計指針の確立

FTIR を用いた中赤外光ナノアンテナの透

過率特性と電磁界シミュレーターとを比較し、負荷抵抗依存性、受光効率等を評価、ナノアンテナ設計指針を確立した。またナノアンテナのアレー化は受光面積の確保の点で不可欠である。アンテナ最適配置に必要なアンテナ実効面積の評価を行った。

(2) 赤外光検出器作製プロセスの確立

我々は全リソグラフィプロセスに電子線描画を導入し、低ダメージで耐フッ素性の高いイオンビームスパッタによる MgO 薄膜および NbN 薄膜を無機レジストとして用いた、ナノアンテナ作製プロセスを考案した。また具体的な素子構造を検討し、高い特性均一性、再現性を有する赤外光検出器作製プロセスを確立した。

(3) ナノアンテナ結合型赤外検出器の特性評価系の構築と検出器評価

ナノアンテナ結合型近赤外検出器の極低温での特性評価を行うため、小型冷凍機およびクライオスタットで構成する極低温冷却系、近赤外パルス光照射系の整備・構築を実施した。最終年度において、試作したナノアンテナ結合型近赤外検出器のパルス光入射応答を測定、赤外光検出器の特性評価を行った。

4. 研究成果

(1) 中赤外用スロットアンテナの評価と設計指針の確立

我々は新たな光-検出器結合方式として中赤外領域で動作可能なナノアンテナ構造を提案している。中赤外スロットアンテナのアンテナ設計指針の確立を目的として、同アンテナのアンテナインピーダンス評価、実効面積評価について実施した。

スロットアンテナの設計には電磁界解析シミュレーター (SONNET EM Simulator) を用いた。ここで金属の表面インピーダンスを適切に設定することが重要であるが、赤外光領域では異常表皮効果を考慮する必要があり、低周波数領域で用いる表皮深さからは導出することができない。そこで赤外域多入射角分光エリプソメーターを用いて、アンテナを構成する金薄膜の中赤外光領域での複素屈折率を測定、その結果から金薄膜の表面インピーダンスを導出して、電磁界解析シミュレーターに組み込んでいる(図1参照)。

給電部に負荷抵抗(R_{Load})を設置したアンテナは、動作周波数において電磁波の吸収体であると考えられることができる。このことから赤外フーリエ変換分光装置(FTIR)を用いて反射率を測定することで、中赤外光アンテナの周波数特性の評価が可能であると考えた。図2に作製したスロットアンテナの光学顕微鏡写真と概略図を、また図3にスロットアンテナ特性評価に使用した FTIR 測定系の概略図を示す。ここでアンテナ一個当たりの吸収による反射率の変化分は極めて少ないので、十

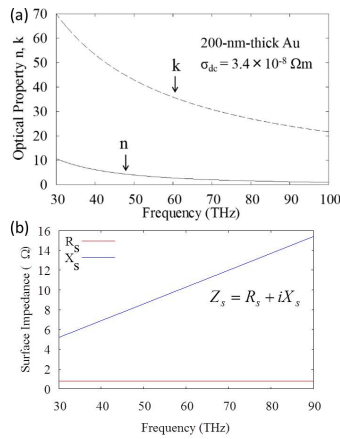


図1 実測した金薄膜の複素屈折率(a)と導出した表面インピーダンス(b)

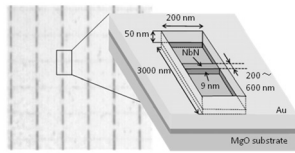


図2 スロットアンテナの顕微鏡写真と概略図

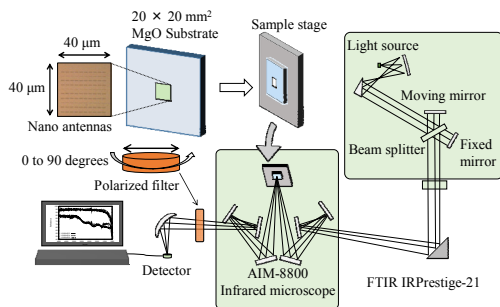


図3 FTIRを用いた中赤外スロットアンテナの特性評価系

分な応答を確保する為、 $40 \times 40 \mu\text{m}^2$ 領域に相互干渉の無視できる縦横共に $4 \mu\text{m}$ 間隔で 11^2 個のスロットアンテナを配置した。

アンテナ構造の構築にはナノレベルでの微細加工が必要であり、本研究では全てのリソグラフィ工程に電子線描画を導入している。またアンテナの形成は膜厚 50 nm の Au 薄膜を用いている。基板には超伝導材料である窒化ニオブ(NbN)と格子整合性が良く、中赤外領域において十分な透過率を有する単結晶 MgO を用いた。本研究ではアンテナの動作設計波長を $4.9 \mu\text{m}$ に設定、シミュレーション結果を基にスロットアンテナ長を 3000 nm 、幅 200 nm とした。図4に電磁界解析シミュレーターによるアンテナインピーダンス(Z_{ant})を示す。45-70 THzの周波数領域ではインピーダンスの変化は小さく、広帯域でのアンテナ動作が期待できる。約 57 THz(波長 $5.3 \mu\text{m}$)付近において虚数成分が消失し、アンテナインピーダンスは約 50Ω と予想された。 R_{Load} としては長さ 200 nm 、膜厚 9 nm (シート抵抗約 $100 \Omega/\square$)の窒化ニオブ(NbN)薄膜抵抗をアンテナ給電部に配置した。薄膜抵抗幅(W)を動作波長の $\lambda/4$ 未満の範囲で変えることにより、 $R_{\text{Load}}=100 \Omega(W=200 \text{ nm})$ 、 $50 \Omega(400$

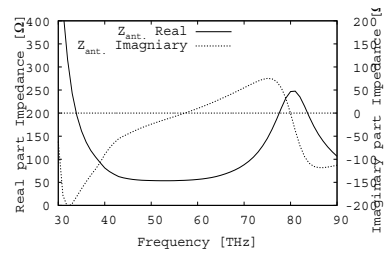


図4 アンテナインピーダンスの計算結果

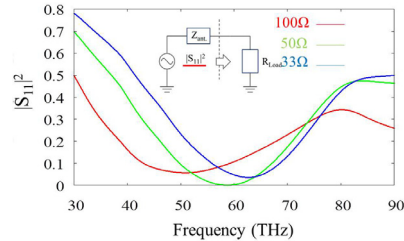


図5 異なる負荷抵抗に対する反射係数 S_{11} の周波数依存性

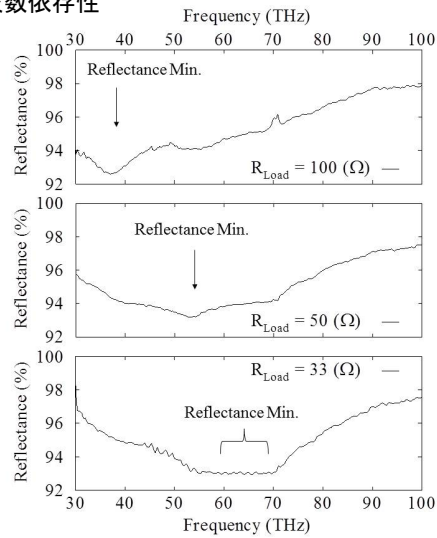


図6 中赤外光スロットアンテナ反射スペクトルの負荷抵抗依存性

nm)、 $33 \Omega(600 \text{ nm})$ の3種類の負荷抵抗を実現している。

負荷抵抗を給電部に設置したアンテナは、 Z_{ant} と R_{Load} とのインピーダンス整合を反映した反射特性を示すと考えた。図5にシミュレーションによる Z_{ant} と、3種類の R_{Load} から導出された反射係数(S_{11})の周波数特性を示す。これらの結果から今回作製したスロットアンテナにおいて、 R_{Load} の増大と共に最大吸収を示す周波数が低下する特性が観測されることを示唆している。図6に作製した負荷抵抗付スロットアンテナの中赤外光反射スペクトルを示す。ここで図中の反射スペクトルは全てスロットアンテナ長軸方向に垂直方向の偏波面に対する特性であり、水平方向の入射に対しては、明確な吸収特性は観察されなかった。測定結果から負荷抵抗の増大に伴い、最大吸収を示す周波数が減少していることが判る。これらの結果は図5の $|S_{11}|^2$ の挙動と定性的に良く一致しており、結果として適切な金属表面インピーダンスを導入した電磁界シミュレーターにより、中赤外光領域に

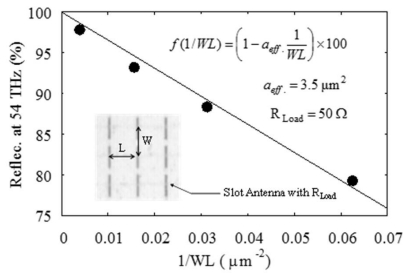


図7 整合状態におけるアンテナ配置密度に対する中赤外光吸収量の変化

においてもスロットアンテナ特性を表現できることを示している。

アンテナに整合負荷を付加した場合、アンテナは有効に働く面積(実効面積)に入射した電磁波は全て負荷抵抗で消費されると思われる。今回のアンテナインピーダンスは54 THz付近において約50 Ωと考えられることから、 $R_{Load} = 50 \Omega$ においては整合状態にあると考えられる。そこでスロットアンテナの密度依存性を評価することで、アンテナの実効面積 a_{eff} を導出することを試みた。給電部分に $R_{Load} = 50 \Omega$ の整合負荷を付加したスロットアンテナを $W \times L = 16 \times 16 \mu m^2, 8 \times 8 \mu m^2, 4 \times 8 \mu m^2, 4 \times 4 \mu m^2$ の4種類の間隔(密度)で配置し、その反射率測定を行った。図7にアンテナ配置密度に対する吸収量の変化を示す。アンテナの相互干渉が無視できる場合、アンテナ密度に比例して吸収量は増大すると考えられる。そこで吸収量を直線近似することでアンテナ実効面積を導出した結果、今回のスロットアンテナ一個当たりの実効面積は約 $3.5 \mu m^2$ と見積もられた。

(2) 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

中赤外光アンテナ動作を超伝導検出器により確認することを目的として、ダイポールアンテナを用いたアンテナ一体型超伝導中赤外光検出器を試作した。長さ2400 nm、幅200 nmのアンテナ(設計波長 $7 \mu m$)を、膜厚50 nmのアルミニウム(Al)薄膜で構成し、その給電部に膜厚5.9 nm、幅、長さ共に200 nmに設定した微小NbN超伝導ストリップを配置した。試作した光検出器の顕微鏡写真を図8(a)、(b)に示す。

図9に作製した超伝導中赤外光検出器の中赤外透過スペクトルを示す。ダイポールアンテナの設計波長は $7 \mu m$ であり、同波長に相当する波数 1400 cm^{-1} 付近に明瞭な吸収が観察できる。但し本素子はダイポールアンテナに対して垂直に検出器バイアスラインを設けており、その為アンテナに対して垂直な偏波面に対しても吸収特性が観測された。しかし $2000\text{-}2500 \text{ cm}^{-1}$ の領域では明瞭な偏波面依存性が観察されている。この領域の電磁波を光検出器に照射し、超伝導検出器の応答特性に偏波面依存性が確認できれば、アンテナで受信した電磁波エネルギーが超伝導検出器に伝達されていることを意味すると考えた。

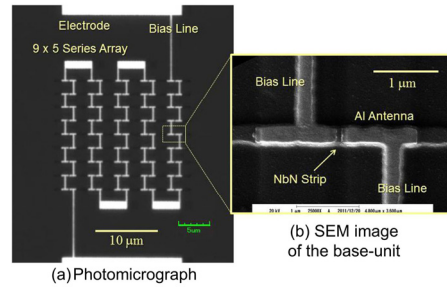


図8 試作した光検出器の光学顕微鏡写真(a)と超伝導光検出部のSEM像(b)

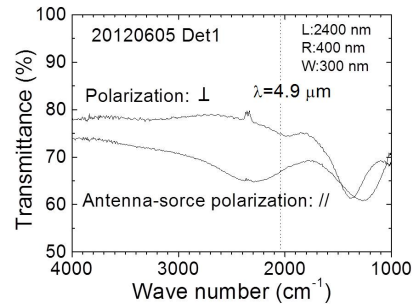


図9 ダイポールアンテナを用いた超伝導中赤外光検出器の中赤外光透過スペクトル

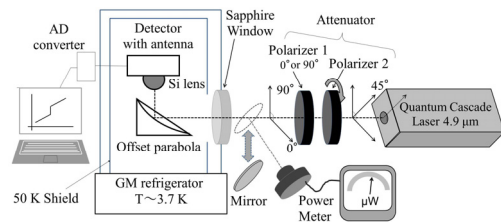


図10 応答特性評価のための中赤外光照射系

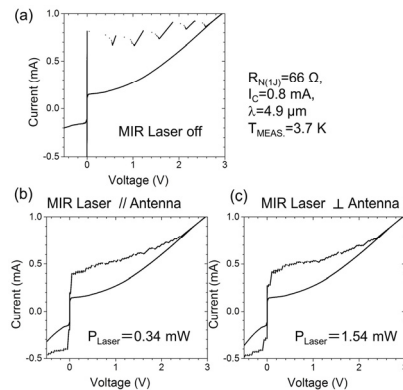


図11 作製した超伝導中赤外光検出器のI-V特性 (a)、照射光の偏波面がアンテナに対して平行(b)と垂直(c)時の中赤外光検出器応答

そこで現有する波長 $4.9 \mu m$ の量子カスケードレーザー(QCL)を用い、I-V特性からアンテナの偏波面依存性の評価を試みた。超伝導中赤外光検出器の応答特性評価のための照射系の概略図を図10に示す。ここで中赤外光検出器に入射する光の偏波面を制御する為、光源からは45度で照射、polarizer 1により照射する電磁波の偏波面を決定した。また入射電力はpolarizer 2を用いて連続的に設定、その電力はパワーメーターにより計測した。

図11に超伝導中赤外光検出器のI-V特性(a)および波長 $4.9 \mu m$ 光入射に対する偏波面

依存性に応じた応答特性(b),(c)を示す。図11(a)において明確な5つの電流のとびを観測することができる。試作した検出器は、図9の素子写真から9個の超伝導光検出部から成る検出部列を、5つ直列接続する構造を有しており、各列間を比較的広い幅を持つAl配線層で接続している。その結果Al配線層がサーマルアンカーとして働き、自己発熱による超伝導から常伝導への連鎖的な転移が各列毎に生じ、列数に対応する電流のとびが生じたと考えられる。I-V特性および直列素子数から各検出部一個当たりのNbNストリップの抵抗は65Ωであった。

偏波面依存性を明確にする目的で、異なる偏波面の赤外光の照射において、抑圧されるNbNストリップの超伝導臨界電流をほぼ同様にするために必要な各入射光電力の測定を行った。図11(b),(c)は、ほぼ同様の臨界電流の減少を示しているが、アンテナに対して平行な偏波面の(b)場合、垂直である(c)に比べて1/4程度の電力で同様な光応答を示すことが判った。このことは中赤外透過スペクトルによる結果と定性的に一致しており、アンテナ動作による中赤外光検出動作を示していると考えている。

(3) 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評価

光ナノアンテナ付中赤外光検出器を試作し、その光応答特性を測定・評価することで、光ナノアンテナの有用性の検討を行った。

図12に試作した超伝導中赤外検出器の(a)SEM像、(b)無照射時のI-V特性を示す。基板にはMgO単結晶基板を用いた。アンテナはツインスロットアンテナを採用、アンテナサイズは波長4.9μmの中赤外光を想定して長さ2.6μm、幅0.2μmとした。ツインスロットアンテナ中心に検出部を配置、インピーダンス調整の為に膜厚NbN(3.5nm)/Nb(4.6nm)/NbN(3.5nm)の多層膜超伝

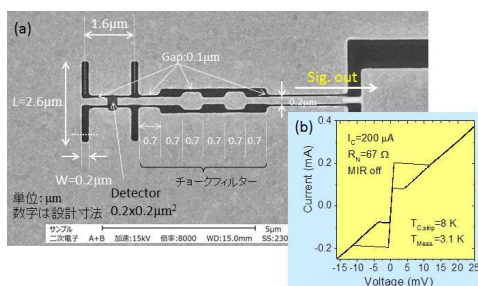


図12 ツインスロットアンテナ付超伝導中赤外

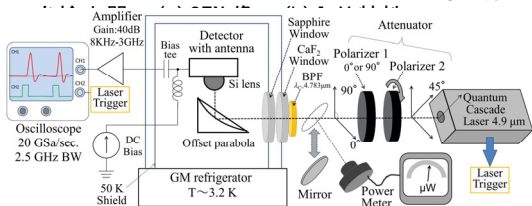


図13 中赤外検出器の応答特性評価系

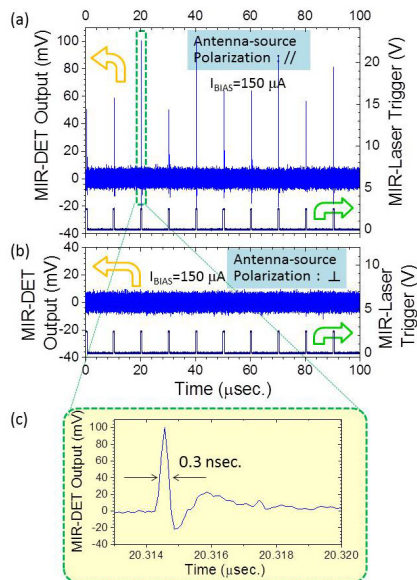


図14 中赤外光応答特性の偏波面依存性. (a) アンテナと光源偏波面が平行. (b) 垂直. (c) 応答波形.

導ストリップ($T_c \sim 8$ K)を検出部に使用した。図13に中赤外光検出器の応答特性評価系を示す。光源には量子カスケードレーザ($\lambda = 4.9 \mu\text{m}$)を用い、繰り返し周波数100 kHz、duty比5%のパルスモードで照射した。光源の偏波面を45度に傾けPolarizer 2は45度に固定、Polarizer 1を0° or 90°に設定することで入射電力一定の条件下で測定した。中赤外光検出器にはバイアステーを介して直流電流バイアスを印加し、その応答波形は室温アンプ(利得40dB)を通してオシロスコープ(20 G サンプル/s、帯域2.5GHz)で観測した。

図15に中赤外光照射に対する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を示す。検出器には臨界電流($I_c \sim 200 \mu\text{A}$)より小さい150 μAに定電流バイアスしている。偏波面がアンテナと一致する平行時にのみレーザー照射と同期した出力を観測し、同検出器の受光機構がツインスロットアンテナによることを裏付けている(図14(a),(b)参照)。図14(c)にその出力応答波形を示す。光照射に対して約0.3 nsec.の出力波形を観測した。試作した超伝導中赤外検出器は優れた高速応答特性を有していると考えている。

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 12 件)

- ① 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 回応用物理学学会春季学術講演会、13a-A14-12、2015 年 3 月、東海大学(神奈川県)
- ② A. Kawakami, “Evaluation of Nano-antennas and Micro-strip lines for Superconducting Mid-infrared Detectors”, The 7th East Asia Symposium on Superconductive Electronics (EASSE2013), 2014 年 10 月 23-26 日、(台湾)
- ③ 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 回応用物理学学会春季学術講演会、20a-A22-1、2014 年 9 月、北海道大学(北海道)
- ④ 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、(米国)
- ⑤ 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、(米国)
- 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 回応用物理学学会春季学術講演会、18a-D5-6、2014 年 3 月 18 日、青山学院大学(神奈川県)
- ⑦ 堀川隼世、川上 彰、兵頭政春、田中秀吉、武田正典、島影 尚、“超伝導中赤外光検出器用スロットアンテナの評価”、第 74 回応用物理学学会秋季学術講演会、17p-C10-13、2013 年 9 月 17 日、同志社大学 (京都府)
- ⑧ 川上 彰、“テラヘルツ周波数領域における超伝導電磁波検出器の研究開発”、ICT イノベーションセミナー、2013 年 9 月 6 日、エル・おおさか(大阪府)

- ⑨ Junsei Horikawa, A. Kawakami, M. Hyodo, S. Tanaka, H. Shimakage, “Evaluation of Nano Slot Antenna for Mid-Infrared Detectors”, CLEO-PR & OECC/PS 2013, 2013 年 6 月 30 日-7 月 4 日、国立京都国際会館(京都府)
- ⑩ 川上 彰、“中赤外光ナノアンテナの作製と評価”、平成 24 年度 GIGNO 研究領域創成支援プロジェクト研究会、2013 年 3 月 11 日、メルパルク大阪 (大阪府)
- ⑪ A. Kawakami, S. Tanaka, M. Yasui, I. Hosako, Y. Irimajiri, “Design and Fabrication of Quasi-optical NbN Hot electron Bolometer mixers”, Applied Superconductivity Conference 2012, 2012 年 10 月 7-12 日、(米国)
- ⑫ 堀川隼世、川上 彰、兵頭政春、田中秀吉、島影 尚、“中赤外光検出器用スロットアンテナの検討”、第 60 回応用物理学学会春季学術講演会、2012 年 9 月 11-14 日、神奈川工科大学 (神奈川県)

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

- 出願状況 (計 0 件)
○取得状況 (計 0 件)

[その他]

<http://www.nict.go.jp/publication/NICT-News/1207/02.html>

6. 研究組織

(1)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 研究所ナノ ICT 研究室・主任研究員
研究者番号：90359092

(2)研究分担者

島影 尚 (SHIMAKAGE, Hisashi)
茨城大学・工学部・教授
研究者番号：80359091

兵頭 政春 (HYOUDOU, Masaharu)
金沢大学・機械工学系・准教授
研究者番号：30359088

田中 秀吉 (TANAKA, Shukichi)
独立行政法人情報通信研究機構・未来 ICT 研究所ナノ ICT 研究室・研究マネージャー
研究者番号：40284608

武田 正典 (TAKEDA, Masanori)
静岡大学・工学(系)研究科・講師
研究者番号：80470061

(3)連携研究者

なし