

# 中赤外光ナノアンテナ技術

川上 彰 齋藤伸吾 兵頭政春 田中秀吉

中赤外領域における超伝導光検出器の応答性能向上を目指して、ナノアンテナの検討を行った。ナノ微細構造構築のため、電子線描画を用いた作製プロセスを考案した。作製したナノアンテナはAl薄膜ダイポールアンテナで、その給電点にNbN薄膜負荷抵抗を結合させている。ナノアンテナの透過スペクトル測定を行った結果、波数  $1400\text{cm}^{-1}$  ( $f=42\text{ THz}$ ) 付近でアンテナ動作による明瞭な吸収特性を観測した。また給電点のNbN薄膜は優れた超伝導特性を示した。

## 1 まえがき

電磁波は“粒子性”、“波動性”の両特徴を持つが、多くの光検出器は光の“粒子性”に基づくデバイス構造・機構を有している。その理由のひとつは光子の高いエネルギーと短い波長に起因している。しかし近年ナノ微細加工技術の進歩により、光の“波動性”を活かした新たな光デバイスが提案されてきた<sup>[1]-[3]</sup>。本研究が目指す光ナノアンテナ技術もその1つで、光の波長以下の極微細加工技術が実現する、電波技術の赤外光領域への展開である。

超伝導ナノワイヤ単一光子検出器<sup>[4][5]</sup>や超伝導転移端センサ<sup>[6]</sup>など超伝導近赤外光検出器は、高量子効率・時間分解能・低暗計数率などで、既に従来の半導体検出器を凌駕する性能を示している。しかし多くの光検出器と同様に受光機構と検出機構が一体であり、現在の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トリック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ための平面アンテナと、その給電点に配置した窒化ニオブ(NbN)微小極薄膜ストリップによる微小検出器から構成され、アンテナと検出器である微小超伝導ストリップ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<sup>[7]</sup>。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”とに分け、各々最適化を施すことにより更なる高速化・高効率化が可能であると考えた。すなわち本研究課題は、新しい光-検出器結合機構としてナノアンテナを検討することであり、まず中赤外光領域におけるナノアンテナの特性評価を行うことで設計指針及び作製プロセス技術を確立、赤外光検出器の更なる高

速化、高機能化を目指している。

## 2 中赤外光ナノアンテナの作成と評価

中赤外領域でのアンテナ構造構築にはナノサイズ微細構造が必要である。そこで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成プロセスを開発した<sup>[8]</sup>。ここで通常の電子線描画用レジストでは耐プラズマ性が不十分なため、イオンビームスパッタによる膜厚1-2 nmの酸化マグネシウム(MgO)極薄膜を無機レジストとして用いている。同MgO薄膜は成膜によるダメージが極めて少なく電子線レジストでも容易にリフトオフ法によるパターン転写が可能である。また耐フッ素性が極めて高く、わずか数nmの膜厚でNbN薄膜(膜厚数百nm)のパターニング(幅200nm)を可能にしている。ナノアンテナ設計には電磁界シミュレータsonnetを用いた。ここで必要なMgO屈折率は、報告値( $n=1.624 @ 5.35\ \mu\text{m}$ )<sup>[9]</sup>を使用している。ナノアンテナに整合負荷を接続し、その透過率特性を測定した場合、インピーダンス整合する周波数において“吸収特性”として観測される。またダイポールアンテナは明確な偏波面依存性を持つことから、中・近赤外フーリエ変換型赤外分光光度計(FTIR)を用いて透過特性を評価することで、赤外光領域のアンテナ評価・動作確認ができると考えた。

図1に作成したナノアンテナ素子の概略図及び顕微鏡写真、図2にFTIRを用いたナノアンテナ評価系を示す。作製したナノアンテナは、長さ2400 nm、幅450 nm、厚さ100 nmのAl薄膜ダイポールアンテナである。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)を結合させている。今回有意な吸収特性を得るため、MgO単結晶基板中心の1mm×1mmの領域内全面に、縦2.5 μm横4.5 μm間隔でナノアンテナを配置した。

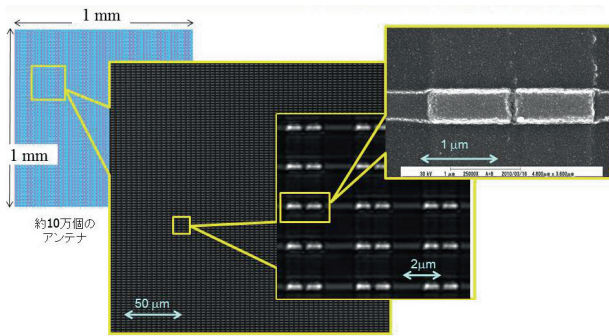
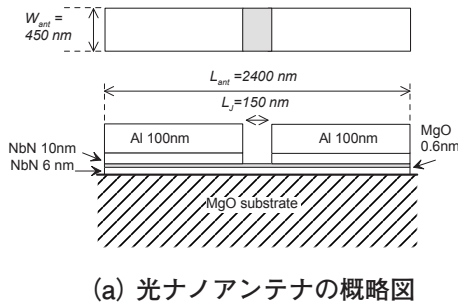


図1 光ナノアンテナの概略図 (a) と顕微鏡写真 (b)

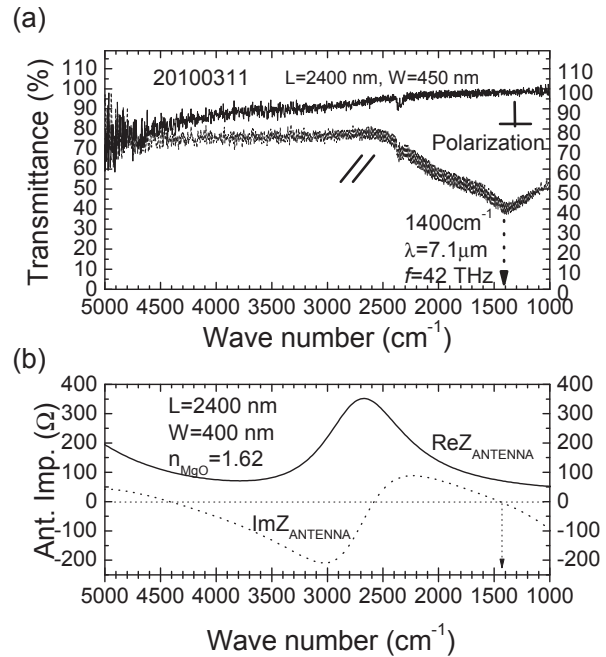


図3 光ナノアンテナの透過率特性 (a) とアンテナインピーダンスの計算結果 (b)

### 3 ナノアンテナ結合型赤外光検出器の試作と作製プロセス評価

3

本研究では、光ナノアンテナ給電点に膜厚数 nm の超伝導極薄ストリップを配置し、給電点に集中する入射エネルギーによる超伝導特性の変化から光検出を想定している。そのためには極薄の超伝導薄膜が、ナノアンテナ作成後においても高い超伝導転移温度、均一な臨界電流など優れた超伝導特性を有することが重要である。そこで今回、ナノアンテナ結合型超伝導赤外光検出器を試作し、素子作成プロセスの妥当性を検討した。

試作したナノアンテナ結合型中赤外検出器は、ナノアンテナとその給電点の微小超伝導ストリップで構成された“検出部”を基本単位としている (図4)。図5に直列バイアス動作によるナノアンテナ結合型中赤外光検出器の概略図を示す。同光検出は検出部を多数個直列接続し、全ての検出部に微小超伝導ストリップの臨界電流より若干小さいバイアス電流を印加する。ここで光子がアンテナに入射した場合、給電点の超伝導臨界電流が入射光子のエネルギーによりバイアス電流値未満に減少する。その結果として超伝導状態が常伝導状態に転移し、バイアス電流により直流電圧が発生することを想定している。複数光子が入射した場合、電圧状態になった検出部の数に応じて出力電圧が発生すると考えている。

図6に試作したナノアンテナ結合型検出器の顕微鏡写真を示す。アンテナ長、幅は各々2400 nm、200 nmで、

FTIR による透過率測定は全て室温にて実施した。

図3に FTIR 透過率測定結果とアンテナインピーダンスの計算結果を示す。入射光の偏光方向がアンテナと一致する場合、波数  $1400\text{ cm}^{-1}$  ( $42\text{ THz}$ ) 付近において明瞭な吸収特性が観測された。一方入射光とアンテナの偏波面が  $90$  度異なる場合、顕著な吸収特性は確認できなかった。アンテナインピーダンス  $Z_{\text{ANTENNA}}$  の計算結果から、同波数付近で  $Z_{\text{ANTENNA}}$  の虚数成分がゼロとなり、実数成分は負荷抵抗約  $60\ \Omega$  と一致することがわかる。また測定された約  $50\%$  の最大吸収率は、アンテナ実効面積と物理的配置間隔から得られる理論値吸収率とはほぼ一致しており、これらは中赤外領域におけるアンテナ動作を裏付けている。

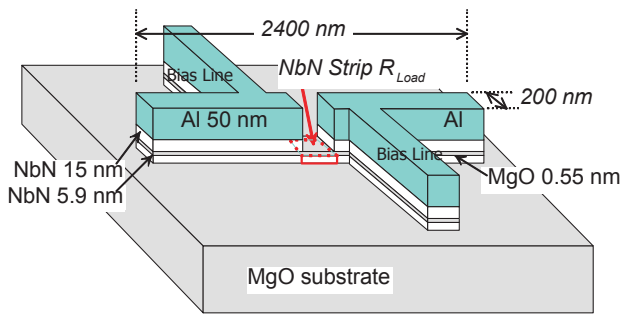
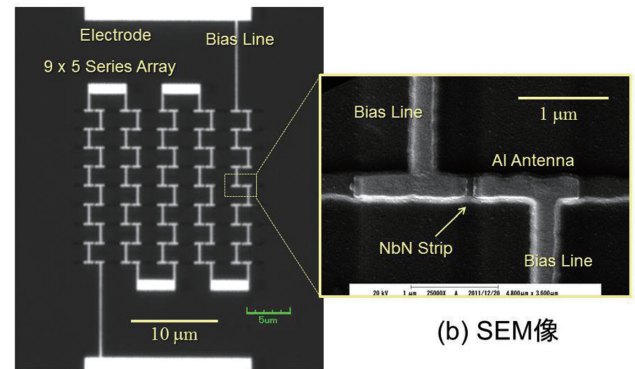


図4 検出部の概略図



(a) 光学顕微鏡像

図6 試作した光ナノアンテナ結合型中赤外光検出器

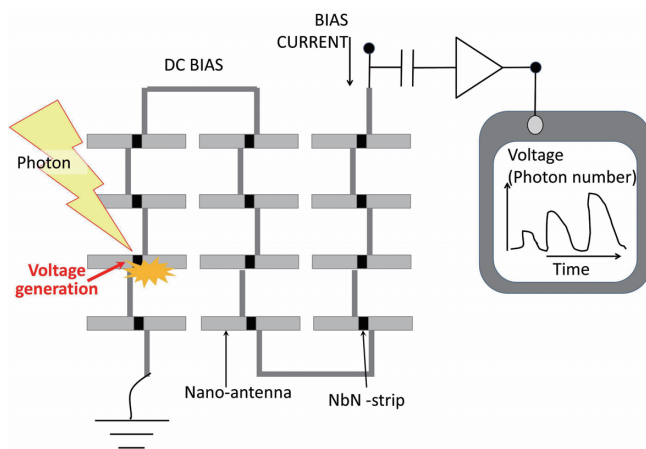


図5 直列バイアス動作によるナノアンテナ結合型赤外光検出器

その給電点に幅、長さ共に200 nmの微小NbN超伝導ストリップ(膜厚5.9 nm)を配置した検出部で構成されている。今回 $20 \times 20 \mu\text{m}^2$ 領域に45個の検出部をアンテナ偏波方向 $4.4 \mu\text{m}$ 、垂直方向 $2.2 \mu\text{m}$ の間隔に配置した。図7に試作したナノアンテナ結合型検出器の電流-電圧特性を示す。130~160  $\mu\text{A}$ の電流領域において検出部の直列数に一致する45個のとびが観測された。また検出部1個あたりの素子抵抗(NbN超伝導ストリップ負荷抵抗: $R_{\text{Load}}$ )は約150  $\Omega$ であった。超伝導ストリップの超伝導転移温度は約11.8 Kを示したが、これは膜厚5.9 nmのNbN薄膜の転移温度としては良好な値である。このことから作成プロセス後の超伝導特性の劣化は見られず、プロセスの妥当性が確認できた。

## 4 むすび

中赤外領域におけるナノアンテナの設計・特性評価を行った。作製したナノアンテナはダイポールアンテナで40 THzでの動作を想定して設計した。アンテナ給電点に整合負荷としてNbN薄膜負荷抵抗を配置、ナノアンテナの透過スペクトル測定を行った結果、波数 $1400\text{cm}^{-1}$  ( $f = 42 \text{ THz}$ )付近でアンテナ動作によるも

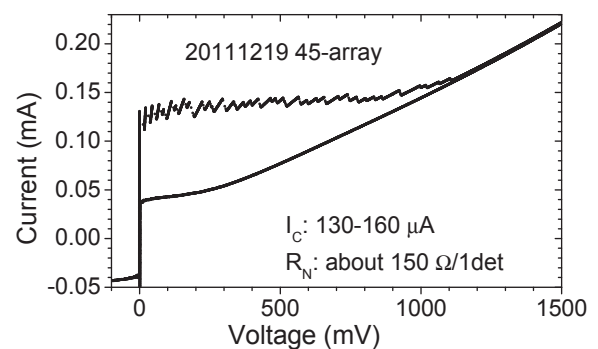


図7 試作した検出器の電流-電圧特性

のと考えられる明瞭な吸収特性を観測した。今回、全リソグラフィに電子線描画を用いた作成プロセスを考案、作成プロセス評価を目的として、ナノアンテナ結合型超伝導光検出器を試作した。アンテナ給電点に配置した超伝導極薄膜は良好な超伝導転移温度( $T_c=11.8\text{K}$ )と均一な臨界電流を示し、作製プロセスの妥当性が確認された。今後、中赤外領域における光応答スペクトル評価及び光応答における応答速度等特性評価を行う予定である。

## 【参考文献】

- 1 L. Tang, S. Kocabas, S. Latif, A. Okay, D. Sebastien, L. Gagnon, K. Saraswat, and D. Miller, "Nanometre-scale germanium photodetector enhanced by a near-infrared dipole antenna," *Nature Photon.*, Vol. 2, pp. 2262-229, 2008.
- 2 T. H. Taminiau, F. D. Stefani, F. B. Segerink, and N. F. Van Hulst, "Optical antennas direct single-molecule emission," *Nature Photon.*, Vol. 2, pp. 234-237, 2008.
- 3 T. Kosako, Y. Kadoya, and H. F. Hofmann, "Directional control of light by a nano-optical Yagi-Uda antenna," *Nature Photon.*, Advanced online publication, 2010.
- 4 G. Gol'tsman, O. Okunev, G. Chulkova, A. Lipatov, A. Semenov, K. Smirnov, B. Voronov, A. Dzardanov, C. Williams, and R. Sobolewski, "Picosecond superconducting single-photon optical detector," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 79, pp. 705-707, 2001.
- 5 S. Miki, T. Yamashita, M. Fujiwara, M. Sasaki, and Z. Wang, "Multichannel SNSPD system with high detection efficiency at telecommunication wavelength," *Opt. Lett.*, Vol. 35, pp. 2133-2135, 2010.



### 3 超伝導デバイス

- 6 D. Fukuda, G. Fujii, A. Yoshizawa, and H. Tsuchida, "High Speed Photon Number Resolving Detector with Titanium Transition Edge Sensor," J. Low temp Phys, Vol. 151, pp. 100-105, 2008.
- 7 S. Miki, Y. Uzawa, A. Kawakami, and Z. Wang, "IF bandwidth and noise temperature measurements of NbN HEB mixers on MgO substrates," IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 11, pp. 175-178, Mar. 2001.
- 8 A. Kawakami, S. Saito, and M. Hyodo, "Fabrication of Nano-Antennas for Superconducting Infrared Detectors," IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 21, pp. 632-635, 2011.
- 9 R. E. Stephens and I. H. Malitson, "Index of refraction of magnesium oxide," J. Res. Nat. Bur. Stand, Vol. 49, pp. 249-252, Oct. 1952.



**川上 彰** (かわかみ あきら)

未来 ICT 研究所ナノ ICT 研究室主任研究員／  
テラヘルツ研究センターテラヘルツ連携研究  
室主任研究員兼務  
博士 (工学)  
超伝導エレクトロニクス、ナノデバイス技術



**齋藤 伸吾** (さいとう しんご)

未来 ICT 研究所超高周波 ICT 研究室主任研究員  
博士 (理学)  
テラヘルツ波、固体分光学、超高速現象

**兵頭 政春** (ひょうどう まさはる)

未来 ICT 研究所企画室専門推進員／テラヘル  
ツ研究センターテラヘルツ連携研究室主任研  
究員兼務  
博士 (工学)  
光エレクトロニクス、原子光学



**田中 秀吉** (たなか しゅうきち)

未来 ICT 研究所ナノ ICT 研究室研究マネー  
ジャー／テラヘルツ研究センターテラヘルツ  
連携研究室主任研究員兼務  
博士 (理学)  
ナノ固体物性、走査プローブ顕微鏡および分  
光測定、物性物理学、ナノスケール構造科学