

基板吸収型テラヘルツ波検出器のイメージングに関する研究

Terahertz Imaging using a Superconducting Tunnel Junction on Terahertz Absorber

プロジェクト代表者

田井野徹（理工学研究科・助教）

Tohru TAINO (Graduate School of Sci. & Eng.)

1 はじめに

テラヘルツ波は赤外線とミリ波の中間に位置する。テラヘルツ波の周波数帯 0.3 THz から 10 THz の領域では、光と電磁波双方の特徴を併せ持つ。そのため、工業、医療、基礎科学などの様々な分野における応用が期待されている[1-3]。

これまでテラヘルツ波の検出には、主として熱型検出器や量子型検出器が用いられてきた。熱型検出器は、広い波長において一定の感度を持つが応答速度が遅い。一方量子型検出器は、応答速度は速いが波長帯に制限がある。そこで、これらの既存の検出器に代わる新たな原理に基づいた超伝導トンネル接合（Superconducting Tunnel Junction : STJ）素子が着目されている。STJ 素子を用いたフォトン検出器は、高エネルギー分解能、高速、広帯域検出器として国内外において盛んに研究が進められている[4-6]。本研究グループでは高速、広帯域の特徴を併せ持つ検出器として、基板吸収型 STJ 素子を用いてテラヘルツ波の検出に成功している[7-9]。ここで、テラヘルツ波を効率よく、かつ広帯域で検出するため、テラヘルツ波帯で吸収率の高い基板を使用している。

本報告では、今年度プロジェクト研究としての研究結果の一部について紹介する。

2 基板吸収型 STJ 素子

STJ 素子は、2 枚の超伝導体間で薄い絶縁体を挟んだサンドイッチ構造からなる。一方の超伝導体電極に 2Δ 以上のエネルギーが付与されると、超伝導体内のクーパー対が解離して準粒子が生成される。トンネル障壁をトンネリングした準粒子を信号電荷として収集することで入射したエネルギーが判別できる。図 1 に、本研究で用いた基板吸収型 STJ 素子の断面図を示す。基板吸収型 STJ 素子のテラヘルツ波検出原理は、通常のフォトン検出用 STJ 素子とは異なる。まず、テラヘルツ波は基板側から照射する。基板内ではテラヘルツ波の吸収によって格子振動(フォノン)が発生する。基板で発生したフォノン群は基板内を伝播し、その一部は STJ 素子へ入射する。フォノンが STJ 素子の下部超伝導電極に到達することで、電極内のクーパー対を解離して準粒子を生成し、この準粒子の増加に伴うトンネル電流の増加分を信号として検出する。

ここで素子の基板を吸収体としてテラヘルツ波を検出する、基板吸収型 STJ 素子において基板材料の選定は重要である。我々は、テラヘルツ波を吸収しやすい材料として LiNbO_3 (ニオブ酸リチウム)、 LiTaO_3 (タンタル酸リチウム)を用いた。通常、STJ 素子基板として使用しているサファイア基板と比較して、テラヘルツ波帯において約 20 倍吸収率が高い。

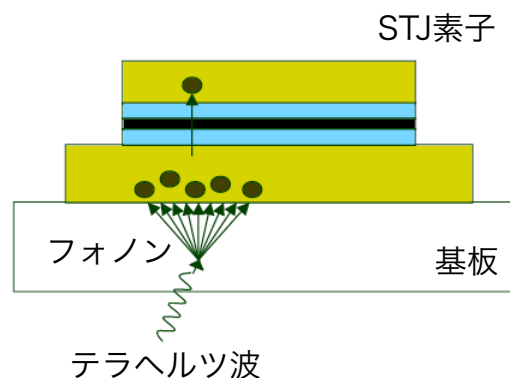


図1 基板吸収型 STJ 素子の断面図

また LiNbO_3 、 LiTaO_3 共に、音響インピーダンスが STJ 素子の超伝導材料とほぼ等しく、フォノンの反射の影響が少ないことも採用した理由のひとつである。

3 検出器の作製と特性評価

基板吸収型 STJ 素子は、 LiNbO_3 、 LiTaO_3 とサファイア基板上に作製した。STJ 素子は、通常の半導体作製工程とほぼ同様に作製が可能で、薄膜堆積にスパッタ装置、薄膜加工にフォトリソグラフィ技術、エッチング装置を用いている。STJ 素子は、これまで実績のある $\text{Nb}/\text{Al}-\text{AlO}_x/\text{Al}/\text{Nb}$ 構造を採用した[10]。STJ 素子は、3 インチの基板上に薄膜堆積、薄膜加工を繰り返し図 1 のような構造になる。 LiNbO_3 基板上の作製した素子顕微鏡写真を図 2 に示す。同図に示す素子のサイズは $50\mu\text{m} \times 50\mu\text{m}$ である。ここで素子の上部 Nb(ニオブ)超伝導電極と下部 Nb 超伝導電極間は、電氣的絶縁をとるために層間絶縁膜 SiO_2 (二酸化ケイ素)を積層している。また上部電極と配線層は $3\mu\text{m} \times 3\mu\text{m}$ のコンタクトホールを通じて接続される。配線層の幅は、配線層、下部配線共に $5\mu\text{m}$ である。素子に通電する際にはボンディングパッドを通じて電流を流す。

作製した素子は、電流-電圧特性を観測し、評価した。測定は 4.2K、1.6K、0.4K の温度条件下で行った。4.2K および 1.6K についてはヘリウム 4 とヘリウム 4 の減圧で、また 0.4K は簡易型クライオスタットを用いてヘリウム 3 の減圧で到達できる。測定には LiNbO_3 基板上に作製した $50\mu\text{m} \times 50\mu\text{m}$ 素子を用いた。電流-電圧特性から、素子性能の指標のひとつであるリーク電流(熱励起以外に起因する電流成分)は 0.5nA であった。リーク電流の理論値と比較して約 10 倍大きい。これはトンネル障壁周辺からのリーク電流に起因し、素子作製方法に改善の必要がある。

4 テラヘルツ波検出測定

我々は、 LiNbO_3 基板上に作製した STJ 素子を用いて初めてテラヘルツ波の検出に成功している[7]。テラヘルツ波照射実験のセットアップを図 3 に示す。テラヘルツ波発生光源には、テラヘルツパラメトリック発振器 (Terahertz Parametric Oscillator : TPO)を用いた[11]。図 3 に示すとおり、テラヘルツ波は光学レンズやフィルタを通じてクライオスタット内に照射される。その後、テラヘルツ波はシリコン超半球レンズで集光され、レンズに直接貼り付けられた素子に対して基板側から入射される。基板内のフォノンの伝播によって生成される準粒子をテラヘルツ波検出信号として、プリアンプを通じて増幅した後、プリアンプ出力波形をオシロスコープで観測する。このときのテラヘルツ波の検出結果を図 4 に示す。STJ 素子の出力パルス間隔と、TPO から照射されるテラヘルツ波のパルス周期が等しいことから、STJ 素子がテラヘルツ波を検出していることを確認した。

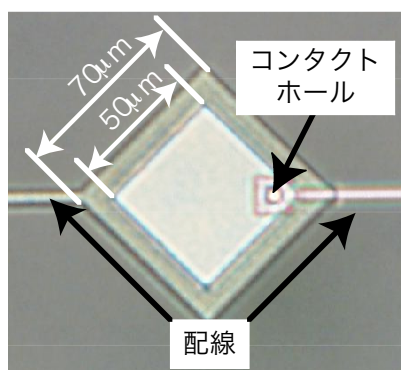


図2 作製した基板吸収型STJ素子の顕微鏡写真

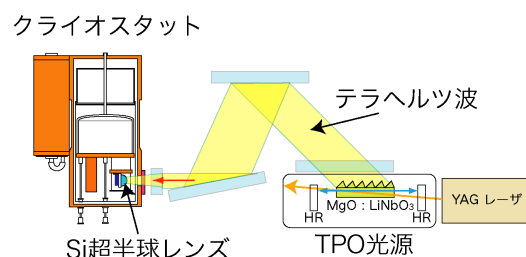


図3 テラヘルツ波照射実験のセットアップ図

次にテラヘルツ波の周波数を 1 から 2THz まで変化させたときの、基板吸収型 STJ 素子の出力特性を観測した。比較として、熱型検出器である DLATGS(Deuterated L-Alanine Tryglycine Sulphate)焦電検出器の検出出力を用いた。図 5 に、STJ 素子と DLATGS 検出器の周波数依存性を示す。測定には、LiNbO₃ 基板上の 50 μ m \times 50 μ m の STJ 素子を用いた。図 5 より、STJ 素子と DLATGS 検出器の出力特性はほぼ等しいことがわかる。DLATGS 検出器は広帯域に渡りフラットな出力特性を示すことが知られており、出力は TPO 光源の出力特性を反映している。即ち STJ 素子も、DLATGS 検出器と同様に 1 から 2THz の範囲にわたりフラットな特性を示すことがわかった。

また LiNbO₃ 基板上の、面積の異なる STJ 素子を用いて 1.5THz のテラヘルツ波を照射した際のプリアンプ出力を観測した。測定に用いた素子は、20 μ m \times 20 μ m、50 μ m \times 50 μ m、100 μ m \times 100 μ m とした。図 6-(a)に STJ 素子のプリアンプ出力を、図 6-(b)にプリアンプ出力を元にした微分波形を示す。図 6-(a)より、基板と接する下部電極の大きさに依存して出力波形が大きくなっていることがわかる。また図 6-(a)の立ち上がり部分に着目して、その結果を時間微分した波形を図 6-(b)に示す。その結果、立ち上がり時間がナノ秒オーダーの鋭い波形、マイクロ秒オーダーの緩やかな波形、ナノ秒とマイクロ秒オーダーの両方を併せ持つ波形、の 3 種類の波形を観測することができた。また 3 種類の面積を持つ STJ 素子の周波数依存性を観測したところ、面積が大きい素子の特性は図 5 のような特性を得ることができた。一方、面積が小さい素子の特性は、図 5 のように周波数によって出力の大きさに変化が現れない、フラットな特性が得られた。これらの結果から、STJ 素子のテラヘルツ波検出過程には、STJ 素子の電極に直接吸収された成分(鋭い立ち上がり)と基板で吸収された成分(緩やかな立ち上がり)の 2 種類が存在することが推察できる。

図 6-(a)より、下部電極の大きさによって出力波高が異なることがわかった。そこで面積と出力波高値の関係を調べるために、上部電極面積一定で下部電極面積が異なる STJ 素子と下部電極面積一定で上部電極面積の異なる STJ 素子の作製を行った。作製した素子に、1.4THz のテラヘルツ波を照射した際のプリアンプ出力を観測した。図 7 に、上部電極面積を一定にして下部電極面積を変化させた STJ 素子の結果を示す。同図

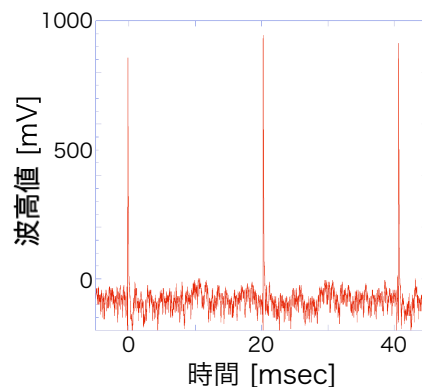


図4 基板吸収型STJ素子を用いたテラヘルツ波
検出結果

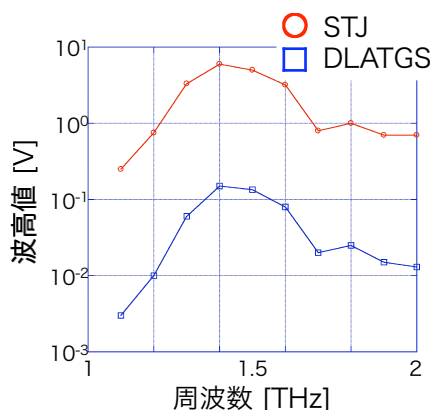


図5 基板吸収型STJ素子とDLATGS検出器を
用いた波高値・周波数依存性

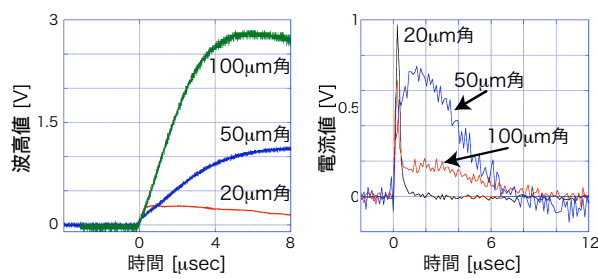


図6 3種類の面積の異なる基板吸収型STJ素子に
1.5THzのテラヘルツ波を照射したときの
(a)検出信号、(b)検出信号の微分波形

の結果より、緩やかに減少しているがほぼ一定の値であることがわかる。図 8 は、下部電極面積を一定にして上部電極面積を変化させた STJ 素子の出力結果を示す。図 7 および図 8 の結果から、出力波高値は下部電極面積に依存せず上部電極面積に依存する。しかしながら上部電極面積に単純に比例していないことも推察できる。ここで、テラヘルツ波が基板に照射され、発生した準粒子の拡散距離 λ を考える。STJ 素子上部電極の一辺の長さを x とすれば、下部電極面積の中でトンネル電流に寄与できる準粒子の発生領域は $(x+\lambda)^2$ で表される。出力信号の大きさが $(x+\lambda)^2$ に比例すると仮定すると、 λ は約 $7\mu\text{m}$ と算出される。この値は、参考文献[12] とほぼ一致している。

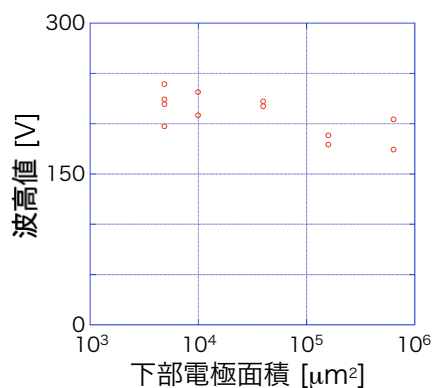


図 7 基板吸収型 STJ 素子の下部電極を変化させたときのテラヘルツ波検出結果

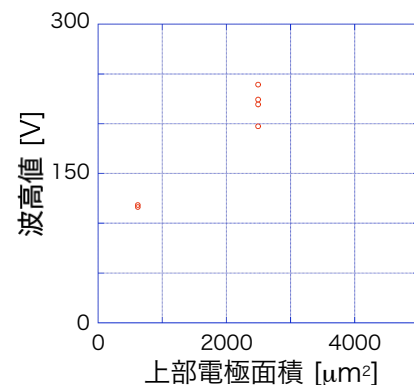


図 8 基板吸収型 STJ 素子の上部電極を変化させたときのテラヘルツ波検出結果

5 まとめ

新しい原理に基づく、テラヘルツ波検出器として基板吸収型 STJ 素子の開発について紹介した。今後は基板吸収型検出器としての最適な素子配置、面積などをつめるとともに、出力を増大させるための手法も現在検討中である。また、テラヘルツ波帯の特徴のひとつでもある吸収スペクトルに着目した分光イメージングにも取り掛かる予定である。

文 献

- [1] K. Kawase, Y. Ogawa, Y. Watanabe, and H. Inoue, Non-destructive terahertz imaging of illicit drugs using spectral fingerprints, *Optics Express*, Vol. 11, pp.2549-2554, 2003.
- [2] M. Yamashita, K. Kawase, C. Otani, T. Kiwa, and M. Tonouchi, Imaging of large-scale integrated circuits using laser terahertz emission microscopy, *Optics Express*, Vol. 13, No. 1, pp.115-120, 2004.
- [3] A. Dobroiu, M. Yamashita, Y. Ohshima, Y. Morita, C. Otani, and K. Kawase, Terahertz Imaging System Based on a Backward-Wave Oscillator, *Appl. Optics*, Vol. 43, No. 30, pp.5637-5646, 2004.
- [4] G. Angolover, P. Hettl, M. Huber, J. Jochum, F. v. Feilitzsch, and R. L. Moßbauer, Energy resolution of 12 eV at 5.9 keV from Al-superconducting tunnel junction detectors, *J. Appl. Phys.*, Vol. 89, No. 2, pp.1425-1429, 2001.
- [5] M. Frank, C. A. Mears, S. E. Labov, F. A. Lindemam, L. J. Hiller, H. Netel, and A. Barkneth, High-resolution X-ray detectors with high-speed SQUID readout of superconducting tunnel junctions, *Nucl. Instrum. Methods*, A370, pp.41-43, 1996.
- [6] M. Frank, L. J. Hiller, J. B. Grand, C. A. Mears, S. E. Labov, F. A. Lindemam, H. Netel, D. Chow and A. Barkneth, Energy resolution and high count rate performance of superconducting tunnel junction x-ray spectrometers, *Rev. Sci. Instrum.*, Vol. 69, pp.25-31, 1998.
- [7] C. Otani, T. Taino, R. Nakano, K. Hoshino, T. Shibuya, H. Myoren, K. Kawase, S. Ariyoshi, H. Sato, H. M. Shimizu, S. Takada, A Broad-Band THz Radiation Detector Using a Nb-Based Superconducting Tunnel Junction, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, Vol.15, No.2, pp.591- 5941, 2005.
- [8] T. Taino, K. Hoshino, R. Nakano, C. Otani, H. Myoren, K. Kawase, T. Shibuya, H. Sato, H. M. Shimizu, S. Takada, Development of terahertz detector using superconducting tunnel junction, *Physica C*, Vol.426-431, pp.1731-1735, 2005.
- [9] T. Taino, R. Nakano, S. Yoshimura, H. Myoren, S. Takada, C. Otani, S. Ariyoshi, T. Shibuya, K. Kawase, H. Sato, H. M. Shimizu, A Broadband THz detector using Superconducting Tunnel Junction, *Nucl. Instr. and Meth. A*559, pp.751-753, 2006.
- [10] H. Sato, T. Ikeda, H. Kato, K. Kawai, H. Miyasaka, T. Oku, W. Ootani, C. Otani, H. M. Shimizu, Y. Takizawa, H. Watanabe, H. Nakagawa, H. Akoh, M. Aoyagi, T. Taino, Improved fabrication method for Nb/Al/AlOx/Al/Nb superconducting tunnel junctions as X-ray detector, *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol.35, pp.5090-5094, 2000.
- [11] K. Kawase, J. Shikata, T. Ito, Terahertz wave parametric source, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, Vol. 35, pp.R1-R14, 2002.
- [12] A. Hamster, Superconducting X-ray detectors based on Nb absorbers and Nb/Al tunnel junction, PhD thesis, University of Twente, pp.35, 1999.