

基板吸収型超伝導トンネル接合素子による THz 波検出

THz Detection using Superconducting Tunnel Junctions with Substrate Absorber

中野 蘭*, 田井野徹**, 明連広昭**, 高田 進**

Ran Nakano*, Tohru Taino**, Hiroaki Myoren**, Susumu Takada**

We have proposed and fabricated superconducting tunnel junctions on LiNbO₃ and on LiTaO₃ substrates for high speed and wide energy band photon detectors working at THz-wave band. The current-voltage characteristics of these STJs were equivalent to conventional STJ, which was fabricated on sapphire substrates. Phonons that produced by irradiating 5.9keV X-ray or THz-wave in the substrates can be detected by the STJ. Comparing the experimental results for three types of STJs, phonons that produced in both LiNbO₃ and LiTaO₃ substrates have been detected with high absorption efficiency.

Keywords: THz, STJ, Substrate Absorption, LiNbO₃, LiTaO₃

1. はじめに

赤外光とミリ波の中間領域であるテラヘルツ波 (THz 波) 領域はこれまで発生・検出が難しかったために未開拓の電磁波スペクトル領域として残されてきた。しかし、近年、コンパクトかつ高出力の可変長THz波光源の開発が引き金となり、この波長領域を応用した研究開発が注目されるようになった。THz波は、0.3~10THzの電磁波領域であり、次世代の超高速光通信や環境計測、医療応用など幅広い応用が期待されている。また、基礎科学の分野においても、星間物質などの分子科学、半導体量子構造などの物性物理学、生体を構成する蛋白質やDNAなどの生命科学において新たな現象の発見をもたらす可能性がきわめて高く、THz波領域は最も注目されている分野のひとつでもある¹⁾。THz波の検出には、広い波長範囲において一定の感度を持っているが応答速度が遅い熱型検出器と、波長帯は限られているが応答速度が著しく速い量子型検出器が用いられてきた。本研究では、これら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) を用いた検出器に着目する。STJは高エネルギー分解能・高計測率に加え、可視光からX線領域まで検出できる広帯域の検出器である。この特徴から、量子通信や電波天文、材料診断など様々な分野での応用が期待されている²⁾。このSTJの基板方向からTHz波を入射する、基板吸収型STJを用いてTHz波が検出されることが明らかになった³⁾。ここで基板の選択には、THz波を最も吸収しやすい基板材料としてLiNbO₃やLiTaO₃などを採り上げた。しかし、STJを用いたTHz波の検出において、検出メカニズムについては明らかにされていない。そこで、本研究ではSTJを用いたTHz波検出の際の吸収プロセスを明確にすることを目的とした。

2. STJの動作原理

STJは2枚の超伝導体の間に薄い絶縁体を挟んだサンドウィッチ構造から成る。2枚の超伝導電極のうち、一方の超伝導電極に光子 (エネルギー) が入射されると超伝導体内で準粒子が生成される。この準粒子がトンネルバリアをトンネルする際に流れる電流 (トンネル電流) を信号として検出する。図1にSTJの動作原理を示す。光子が入射すると、電流-電圧特性が実線から破線へと移行する。バイアス電圧値における光子入

* 埼玉大学大学院 理工学研究科 電気電子システム工学専攻

Graduate School of Science and Technology

**埼玉大学 工学部 電気電子システム工学科

Department of Electrical and Electronic Systems,
Faculty of Engineering, Saitama University,
Shimo-Okubo 255, Sakura-ku, Saitama-shi, Saitama
338-8570, Japan

射前と入射後の電流差を信号として検出する。

基板吸収型 STJ の接合断面図を図 2 に示す。フォトンが基板の中で吸収されると、吸収により発生したフォノンが基板中を伝播し、エネルギーを STJ の下部電極に伝達する。このエネルギーにより準粒子が生成され、動作原理に基づいて信号を検出する。

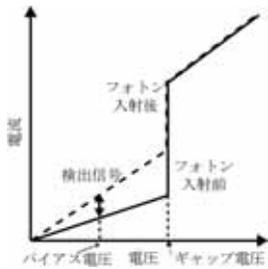


図 1 STJ の動作原理

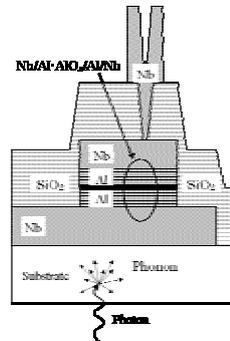


図 2 接合断面図

3. STJ の作製

今回基板として用いたのはTHz帯の吸収係数の高いLiNbO₃とLiTaO₃、吸収係数の低いサファイヤの3種類である。薄膜の堆積にはスパッタ法を、加工にはフォトリソグラフィ技術と反応性イオンエッチング (RIE) を用いた。各層の膜厚は、表 1 に示す。

表 1 STJ の膜厚

材料	膜厚[nm]
Nb 配線層	600
SiO ₂ 絶縁層	350
上部 Nb 電極	150
Al	60
Al-AIO _x	60
下部 Nb 電極	200

4. 素子の評価

作製したSTJの電気的特性を評価するため、STJの動作温度 0.4Kまで冷却可能な³Heクライオスタットを用いて電流-電圧特性を測定した。50×50μm²のダイヤモンド形状のノーマル抵抗R_nとサブギャップ抵抗R_dを測定し、log(R_d/R_n)を算出した。サブギャップ抵抗はバイアス電圧200μVにおける抵抗値である。log(R_d/R_n)の値はLiNbO₃基板上のSTJは4.8、LiTaO₃基板上のSTJは4.3、サファイヤ基板上のSTJは4.9と、ほぼ同等の素子を作製できた。LiNbO₃上に作製したSTJの電流-電圧特性を図3に示す。

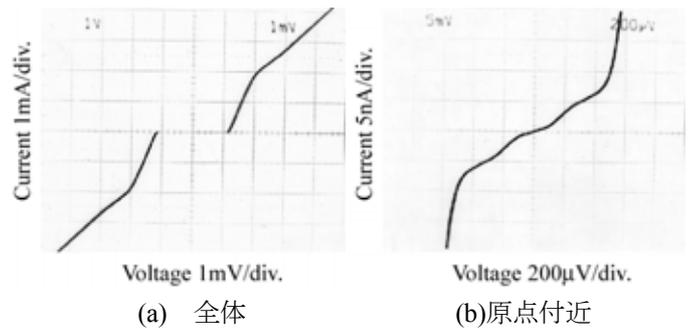


図 3 電流-電圧特性

5. X線検出実験

作製した素子に5.9keVのX線を照射し、エネルギースペクトルを観測した。エネルギースペクトルの低チャンネル側にフォノンイベントのスペクトルが観測されるため、フォノンの影響が目に見えて分かる。

測定に用いた50×50μm²のダイヤモンド形状STJは、3枚の基板(LiNbO₃、LiTaO₃、サファイヤ)上に積層されている。入射するX線は、STJの上部電極側から照射して、STJからの出力信号を増幅・波形整形した後、エネルギースペクトルデータとして蓄積する。3種類の基板上に作製されたSTJからのエネルギースペクトルを比較したところ、図4のようになった。黒実線がLiNbO₃基板、灰色実線がLiTaO₃基板、黒点線がサファイヤ基板上に作製したSTJによるエネルギースペクトルデータである。同図より、LiNbO₃基板およびLiTaO₃基板はサファイヤ基板に比べ、基板中のフォノンイベントの寄与が大きいことが分かる。また、STJの電極で直接X線を吸収した直接吸収の波高値(図中矢印)を基準として、フォノンイベントのピークの波高値の比率を算出したところ、LiNbO₃基板では66%、LiTaO₃基板では70%、サファイヤ基板では25%であった。これより、LiNbO₃基板とLiTaO₃基板では、STJに到達したフォノンエネルギーがサファイヤ基板に比べて3倍程度大きいことが分かった。この原因として(1)LiNbO₃およびLiTaO₃はNbとの音響インピーダンスマッチングがよく、基板から伝達したフォノンが界面で反射されることなくNbに到達する、(2)LiNbO₃基板およびLiTaO₃基板中ではフォノンの平均自由行程が長いこと、多重反射が起こる、などが考えられる。よって、この原因を解明するためには新たに、基板の厚さを

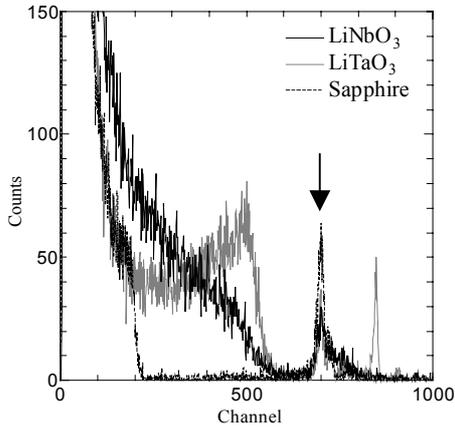


図4 エネルギースペクトル

変え、フォノンイベントの変化を見る実験が必要と思われる。

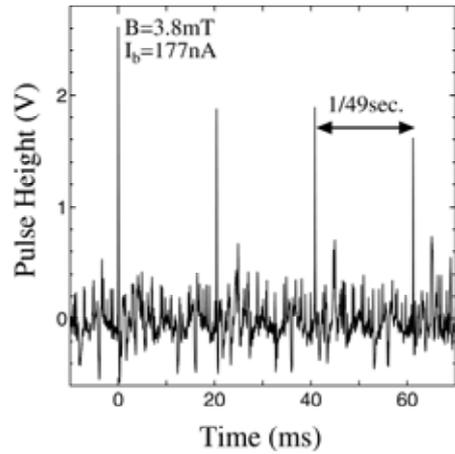
6. THz 波照射実験

次に、作製した素子に対するTHz波照射実験を行った。ここで使用した光源はTHz波パラメトリック発振器 (Terahertz Parametric Oscillator: TPO) である。THz波は、³HeクライオスタットのTPX窓から照射され、シリコン超半球レンズで集光されて、レンズに直接貼り付けた基板に入射される。

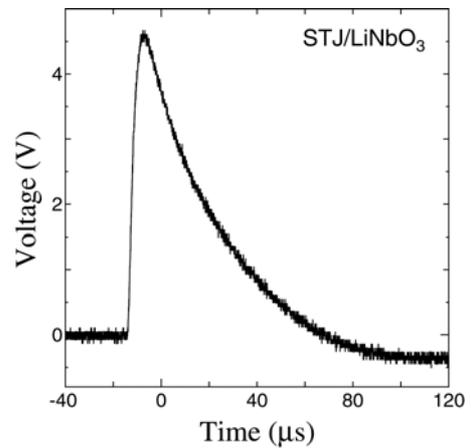
図5は、LiNbO₃上のSTJ(200×200μm²)素子に1.5THzのTHz波照射時のTHz波応答信号を示す。図5(a)に示されるように、THz波パルスの繰り返し周波数(49Hz)に同期して応答信号が出力され、STJ素子によりTHz波が検出可能であることがわかった。図5(b)は、1つの応答波形の拡大図を示している。電荷有感型プリアンプ出力の立ち上がり時間は10μs程度であり、X線照射時の立ち上がり時間(1μs以下)に比べて大きく、基板を吸収体としフォノンを介した基板吸収型の応答であることを示唆している。

図6は、LiNbO₃上のSTJ(200×200μm²)素子を用いて観測したTPO光源のスペクトル測定結果を示す。スペクトルのピークの中心は197chであり、ピークの半値幅が10.6chであることからTPO光源からのTHz波パルスのエネルギーのばらつきは5%よりも小さいことがわかった。このばらつきの中には、STJ素子のエネルギー分解能に対応する成分も含まれていることからSTJ素子のエネルギー分解能は十分に高いことが示唆された。

上述のLiNbO₃上のSTJ素子によるTHz波検出実験においては、基板吸収型の検出であることを示唆する測定結



(a)



(b)

図5 LiNbO₃上のSTJ(200×200μm²)素子によるTHz波応答信号。(a)49Hz繰り返しパルスに対する応答と(b)単一応答波形の拡大図。

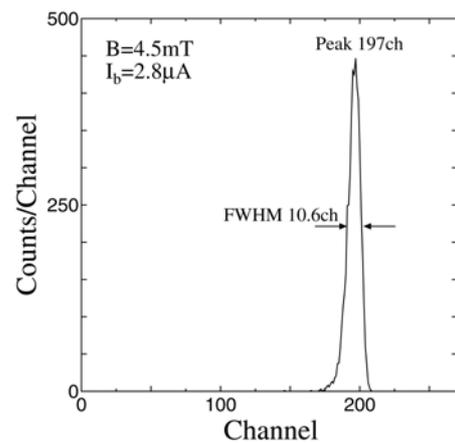


図6 LiNbO₃上のSTJ(200×200μm²)素子によるTHz波スペクトル測定結果

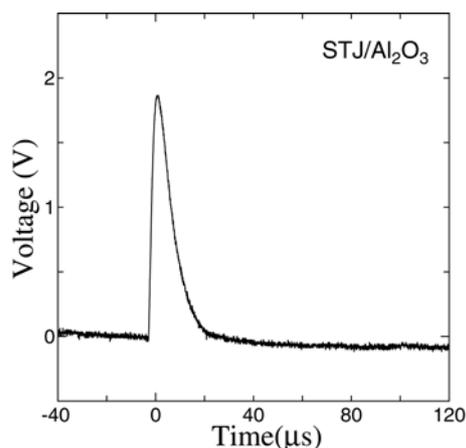


図7 サファイア上のSTJ素子によるTHz波応答波形

果が得られた。一方で、THz波が超伝導電極で直接吸収される直接検出型の応答が存在する可能性も否定できない。そこで、THz波領域で吸収係数の小さいサファイア上のSTJ素子を用いてTHz波の検出実験を行った。

図7は、サファイア上のSTJ素子によるTHz波応答波形を示す。電荷有感型プリアンプの出力の立ち上がり時間は $1\mu\text{s}$ 程度であり、 LiNbO_3 上のSTJ素子による応答波形の立ち上がり時間に比較して短く、また、信号強度も小さい傾向があることがわかった。サファイア上のTHz波応答は、直接検出を示唆する結果であると考えられる。

以上の結果から、 LiNbO_3 上とサファイア上のSTJ素子では検出信号波形や信号強度が大きく異なり、STJ素子によるTHz波検出は、基板フォノンを介する基板吸収成分と素子の電極による直接吸収成分の両方が存在すると考えられる。

7. まとめ

STJを用いたTHz波検出過程を調べるため、3種類の基板上にSTJを作製し、X線およびTHz波の検出結果の比較を行った。ここで、THz帯の吸収係数が大きい基板として LiNbO_3 基板と LiTaO_3 基板を、小さい基板としてはサファイア基板を用いた。

まず、基板から発生するフォノンイベントのスペクトルを観測するため、X線を照射して特性を観測した。その結果、 LiNbO_3 基板と LiTaO_3 基板のフォノンイベント数はサファイア基板よりも多いことが分かった。

次に、TPO光源を用いてTHz波照射実験を行った。基板

側からTHz波を照射し、STJの出力信号を比較したところ、基板によって大きく異なる結果が得られた。サファイア基板の信号立ち上がり時間は短く、電極で光子を吸収した時の立ち上がり時間に一致するが、 LiNbO_3 基板と LiTaO_3 基板の信号立ち上がり時間はそれより遅かった。従って、 LiNbO_3 基板と LiTaO_3 基板はTHz波を基板によって吸収し、サファイア基板はSTJの超伝導電極部分で吸収したと考えられる。これらの結果から、THz波の検出には2つの吸収過程があることが分かった。また、周波数特性を観測したところ、 LiNbO_3 基板と LiTaO_3 基板を用いたSTJは、既存のTHz波検出器と同様の特性を示した。以上より、基板吸収型STJ検出器の吸収プロセスを明確にし、新たなTHz検出器の可能性を示した。

謝辞

本研究を遂行するにあたりご支援を下さった理化学研究所の戎崎俊一客員教授、清水裕彦 博士、川瀬晃道 博士、大谷知行 博士、佐藤広海 博士、有吉誠一郎 博士、志岐成友 博士、倉門雅彦 博士、渋谷孝幸 氏に厚く御礼申し上げます。最後に、貴重な御助言や惜しみない協力をして下さいました電子制御工学研究室の皆様、理化学研究所イメージ情報研究ユニットの皆様、川瀬独立主幹研究ユニットの皆様にご感謝いたします。

参考文献

- 1) 川瀬晃道, 伊藤弘昌, テラフォトニクス光源 一波長可変 THz 波の発生と応用可能性一, 応用物理 71, pp.167-172, Feb.2002.
- 2) Hans Kraus, 超伝導放射線検出器とその将来への展望, 応用物理, 第67巻, 第4号, pp.394-403, Apr.1998.
- 3) 星野耕一, 基板吸収型 STJ を用いた広帯域フォトン検出器に関する研究, 埼玉大学大学院博士前期課程学位論文(2004)