伝送線路型超伝導テラヘルツ検出器の研究

高橋研太[1,2], 有吉誠一郎[2], 倉門雅彦[2,3], 古賀健祐[1,2], 古川 昇[2], 大谷知行[1,2]

東北大理[1], 理研[2], 株式会社テクノエックス[3]

1. はじめに

テラヘルツ（THz）波は周波数 0.3～10 THz（波長では 1,000～30 μm）程度の電磁波であり、赤外線と電波の中間領域に位置する。この帯域はこれまで、発光や検出の困難さからその利用が不十分であったが、近年の研究開発により THz 波特有の透過性や特異な吸収スペクトル等の性質が再認識され、それをいかした応用が数多く提案されている。また、研究分野での利用も模索されており、最遠方宇宙探査や創世期の宇宙観測への利用に向けた研究開発も行われている。

本研究では、極限的な感度が求められる THz 帯の高効率検出器として、伝送線路型超伝導検出器[1]の研究を行った。これは超伝導トンネル接合素子（STJ）を用いたクーパー対解離型検出器であり、超伝導ギャップ周波数以上（Nb 超伝導体では約 0.7THz 以上）で動作すると期待される。その特徴は、超伝導体-絶縁体-超伝導体（SIS）の 3 層膜構造の接合長を十分長く取ることにより、ほぼ 100%の光検出効率が期待できる点にある。本研究では、この検出器の設計・作製と電気特性評価による素子の特性評価及び、検出器としての光学特性評価を行った。

2. 伝送線路型 STJ 検出器の概要

伝送線路型 STJ 検出器の 1 素子の写真を図 1 に示す。素子は、超伝導体の対数周期アンテナ、インピーダンス変換線路、及び、両者を電気的につなぐ長尺の STJ 素子で構成される。従来の THz 用 STJ 検出器[2]では、微小面積の SIS 接合が用いられてきたが、伝送線路型 STJ 検出器では長い SIS 接合を利用する。長い SIS 接合は一種の伝送線路とみなすことができ、入射電磁波は線路を伝わるように SIS 接合の長さ方向へ伝播する。このとき、入射電磁波の周波数がギャップ周波数よりも高いと、電極内のクーパー対を解離して準粒子を励起しながら減衰していく（図 2）。従って、接合長を十分に長く取ることにより、入射電磁波のエネルギーをすべて準粒子励起のエネルギーとして吸収できる。このようにして励起された準粒子は、障壁を量子力学的にトンネルし、その余剰電流を信号として読み取る。

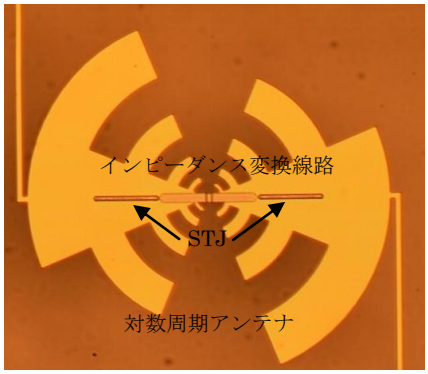

図 1. 伝送線路型 STJ 一画素の写真

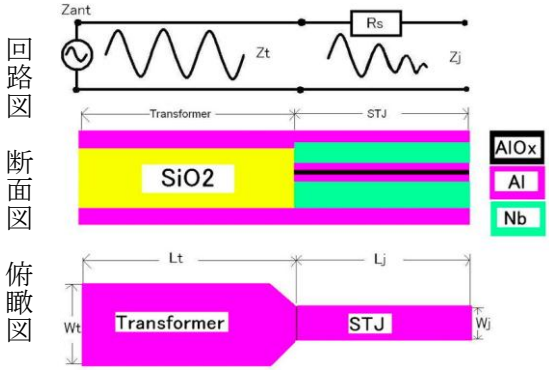

図 2. インピーダンス変換線路と STJ の模式図

3. 伝送線路型 STJ 検出器の設計

伝送線路型 STJ 検出器の設計にあたり、電磁波を十分に吸収する伝搬方向の長さ STJ の長さ L_J を求める[3]。伝送線路を伝搬する交流の振幅 A が十分小さいという条件から、

$$A = \exp\left(-\mathrm{Re}(g)L_J\right) \gg \exp\left(\frac{-G_m Z_J}{2}\right) \quad (1)$$

と書ける。ここで、G_mは損失コンダクタンス、Z_Jは STJ のインピーダンスである。この式から、L_Jとして、2.9、6.7，26.7、50μm を試みることにした。これらの L_Jに対応する減衰量は、それぞれ 1/e、1/10、１0000、〈10^{-8}である。次に、アンテナと SIS 素子とのインピーダンス整合が取れるという条件から、変換線路のインピーダンス Z_{trans} は

$$Z_{trans} = \sqrt{Z_{ant} \times Z_J} \quad (2)$$

で与えられる。ここで、アンテナのインピーダンス Z_{ant}、変換線路のインピーダンス Z_{trans} である。Z_{trans} を求める場合、Z_{ant} は固定し Z_J を変えて整合をとる。この場合の Z_Jは STJ の幅に依存し、幅が狭くなるほどインピーダンスは大きくなるため、STJ の幅 W_J が細いほど広帯域で動作する。本研究では、理研の露光装置の性能を考慮して、W_J を 0.5，1，2μm と設計し、動作帯域についての比較も行える設計とした。

4. 伝送線路型検出器の作製

設計した伝送線路型検出器の STJ 素子を理化学研究所内のクリーンルームで作成した。作製上の困難からフォトマスクの変更や STJ の絶縁層の膜厚の最適化を行い、結果としてニオブ系五層膜(Nb=150/Al=50/AlOx～1/Al=50/Nb=150nm)でサイズバラエティに富んだ STJ の作製に至った。

5. 検出器の特性評価

電気特性評価により、臨界電流密度 40A/cm^2、リーク電流密度が約 100pA／μm^2（4.2K で規格化した 0.3K 残留電流が 4 桁落ち）という比較的良好な SIS 特性をもつ素子について、フーリエ分光器を用いて光学特性評価をした。その結果、近接効果を考慮したギャップ周波数(～0.4THz)以上での検出感度を確認した。また、STJ サイズにより違った光応答や超伝導ギャップ周波数以下での感度を持つことも分かったため、今後は超伝導体内での物理現象を検討する必要がある。

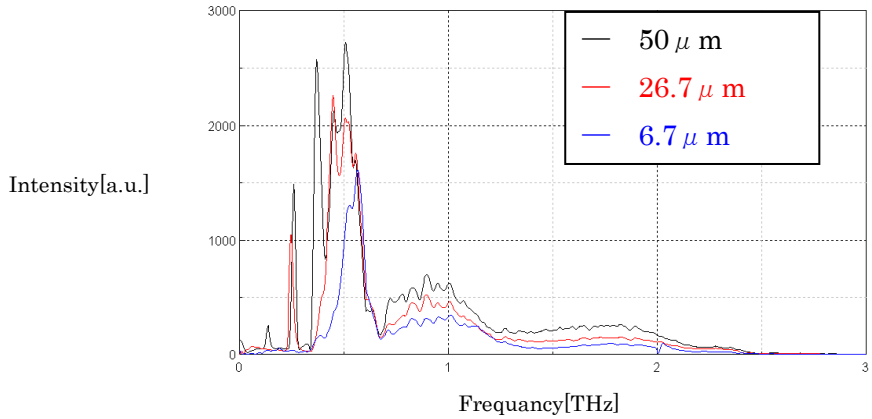

図 3. フーリエ分光器による周波数スペクトルの測定結果

参考文献

[1]T. Noguchi, T. Suzuki, 10thWorkshop on Submillimeter-Wave Receiver Technologies in Eastern Asia (http://mwlab.pmo.ac.cn/easternasia2009/proceeding.html) (2009).

[2] S. Ariyoshi et al, IEEE Trans. Appl. Supercond, Vol. 15, No. 2, (2005)

[3]C. E. Tong and R. Blundell : IEEE Trans. Appl. Supercond, Vol. 7, No. 2, (1997)p. 3597