

超伝導転移端マイクロカロリメータを用いた単一光子計測技術の開発 (052103003)

Single photon detection with superconducting transition edge sensors

研究代表者

福田大治 産業技術総合研究所 計測標準研究部門

Daiji Fukuda, National Metrology Institute of Japan,

National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST/NMIJ)

研究期間 平成 17 年度～平成 18 年度

本研究開発の概要

本研究は、超伝導転移端マイクロカロリメータを応用した高精度単一光子計測技術の確立を目的とした研究である。開発を目指すデバイスは、光パルスのエネルギーを格子系温度へと変換し、その時の非平衡温度変化を超伝導転移端による高感度温度計で検出を行うものである。温度変化は、光パルスのエネルギーに比例するため、その光子数を同定することが可能となる。本研究の最終目標として、80%以上の量子効率、10 個程度の単一光子識別能力、100 kbits/s の伝送速度を持つ素子の開発を目指すものとする。これにより、従来用いられている半導体検出器を大幅に凌駕する性能を持つ計測技術が実現されることになり、量子情報通信や量子コンピュータの分野に画期的な技術革新をもたらすものと期待できる。

Abstract

Photon number discrimination for optical pulses is strongly required in the field of the quantum telecommunication. A superconducting transition edge sensor (TES) is the one of the detectors which has the photon number discrimination capability at a telecommunication wavelength. In this research, we developed the high performance transition edge sensors with 80 % quantum efficiency, high photon number discrimination ability, and 100 kbits/s counting rate.

1. まえがき

量子暗号情報通信や量子光コンピュータの分野では、単一光子の発生とその伝送、そして単一光子の検出が極めて重要な技術となっている。しかしながら現状の単一光子の検出技術は決して満足のいくものではない。これは、半導体検出器では光パルス中に含まれる光子数を識別することが困難であることと、また 1550nm の通信帯波長では量子効率は 20%以下の極めて低い効率に限られてしまうためである。このことは、真の単一光子発生源として期待されている光ターンスタイル素子や量子ドットを用いた素子の特性評価や、量子テレポーテーションや測定誘起非線形ゲートなどの実現に極めて深刻な問題となる。そのため、この高精度単一光子測定技術の欠如は、量子情報通信を本格的に実用化していく上で今後重大な問題となる可能性がある」と指摘されているのが現状となっている。上のような背景から本研究では、単一光子検出の高精度計測技術の開発を目的とした研究開発を行った。その方法であるが従来の半導体による検出手法とは一線を画し、超伝導転移端センサを用いた高精度単一光子検出装置を開発することに基礎を置くものとする。本装置は、単一光子のエネルギーをフォノンの擾乱として捉え、その結果生じる温度変化を超伝導体の抵抗遷移領域を利用した温度センサで計測するものである。本素子を 1 K 以下の極低温で動作させ、量子効率 80 % 以上、応答速度 100 kbits/s、エネルギー分解能 0.2 eV にて 1 個以上 10 個程度までの光子数を識別出来る性能を達成することを目標とする。将来的に単一光子計測の量子標準へと発展させこれを産業界へ供給することも念頭におき、このような数値目標を持つ計測技術の第一段階的な開発を本研究で行うことを目指した。

2. 研究内容及び成果

2.1 超伝導転移端マイクロカロリメータによる受光素子

本研究では、超伝導体チタニウム(Ti)の優位性を生かし、Ti 超伝導薄膜による超伝導転移端マイクロカロリメータ (TES; Transition Edge Sensor)の開発を行った。Ti は、バ

ルク材で 390 mK に転移温度を持ち、熱緩和が速いことから応答速度の高速化が期待出来る。また、1550 nm での反射率が 65 % であり、高い量子効率を実現するには望ましい光学特性を有している。受光素子の作成には、超高真空電子ビーム蒸着や超高真空スパッタ、素子のパターンニングには i 線露光装置、超伝導電極としてのニオブ(Nb)膜の作成にはジョセフソン素子作成分用の dc マグネトロンスパッタ装置を使用した。図 1 に、本研究で作成した Ti-TES 受光素子の顕微鏡写真を示す。中央 4 つの部分が Ti による超伝導薄膜であり、上段が大きさ 20 ミクロン角、下段が 10 ミクロン角である。後に、光検出を行う場合には、これら四つのうちもっとも特性のよい薄膜を選んで光ファイバーと結合して測定を行っている。さらに、外側にある突起状のパターンは、ファイバーとの位置あわせを行うためのアライメント用マーカースとして使用する。

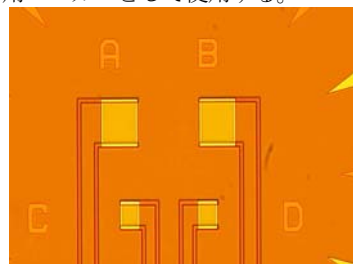


図 1 作成した Ti-TES による受光素子写真

2.2 広帯域電流増幅技術

超伝導転移端マイクロカロリメータに光が入射すると、その応答は超伝導膜の抵抗変化となって現れる。電熱的なフィードバック(ETF; Electro thermal feedback)による安定動作を行うために素子は通常、定電圧バイアスで駆動される。よって、光子入射に伴う抵抗変化は、素子を流れる電流変化となって測定されることになる。この電流変化を測定するためには、通常、超伝導量子干渉素子(SQUID; Superconducting quantum interference device)が用いられる。これは、素子を流れる電流をコイルで一度磁束に変

換し、その磁束とジョセフソン接合との相互作用によって生じる電圧信号として計測するものである。よって、SQUID は入力インピーダンスがほぼゼロの電流電圧アンプとして機能することになる。産総研には、この SQUID に関しては、相当量の技術の蓄積があるため、このポテンシャルを生かし、光子数識別に適した SQUID アンプの作成を行った。これら、超伝導転移端マイクロカロリメータのバイアス回路と SQUID アンプの回路を図 2 に示す。受光素子の信号を高計数率で読み出すために、配線はすべて同軸ケーブルで行っている。また、ETF による電熱的な発振を防ぎ、受光素子を転移端に安定に保持するためには、SQUID アンプの帯域幅が広いことが必要である(素子の応答時定数で決まる帯域に対し、読み出し側の帯域はその 5.2 倍必要)。この条件を満たすため、入力インダクタンスの小さい SQUID 素子を用いた。本読み出し系の周波数特性を測定したところ 5.1 MHz の帯域幅を確保できる結果を得た。この結果から、素子の計数特性としては、1 MHz まで安定に信号取得が行える読み出し系を実現することに成功した。

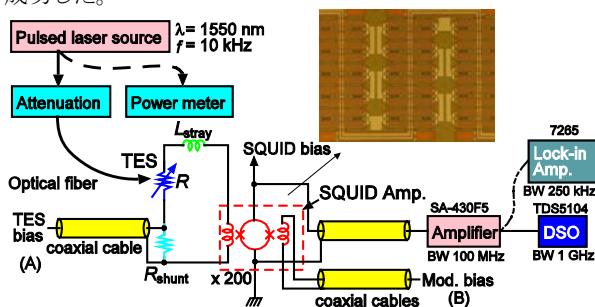


図 2 SQUID による広帯域電流アンプ

2.3 信号応答速度

作成した超伝導転移端マイクロカロリメータ、読み出し電流アンプ、冷凍実験装置を用いて、光子数識別器の性能を評価する実験を行った。図 3 に、光パルスを照射したときの応答信号波形の例を示す。まず、図のように光子入射とともに時定数 30 ns で急速に立ち上がり、その後、0.3 μs の時定数で減衰する信号波形を得ることに成功した。この 0.3 μs の時定数は、米国国立標準研究所にて開発されたタングステンを用いた超伝導素子による結果の 10 倍以上の高速性に相当する。これは、現時点での世界最高記録である。また、図中の n は、光パルスに含まれる入射光子数の概算であり、n に応じて信号波形の波高値が変化していることが分かる。これは、受光素子が光子エネルギーを測定する能力があることを意味している。

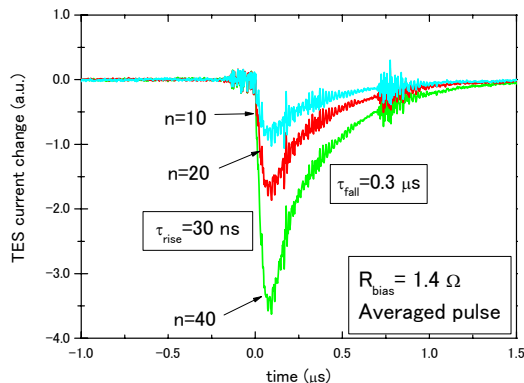


図 3 光パルス照射による応答信号波形例

2.4 光子数識別技術

微弱コヒーレントパルス列を素子に照射し、順次観測されるパルスの応答信号波形に関する波高値のヒストグラムを求めたものを図 4 に示す。図のように、光パルスに含まれる光子数に応じて、いくつかのピークに明確に分離するヒストグラムを観測した。各ピーク群は光パルスに含まれる光子数に対応する。実験によって得られた分布を Poisson 分布で最小二乗法により関数フィッティングした結果を図 4 の赤線で示す。両者は、良好に一致する結果となった。この結果から、我々の作成した Ti-TES によるエネルギー分解能は 0.7 eV(FWHM)と求められた。この分解能は、1550 nm の光子ひとつのエネルギー 0.8 eV よりも小さく、有効に光子数識別できる能力を有していることを示している。

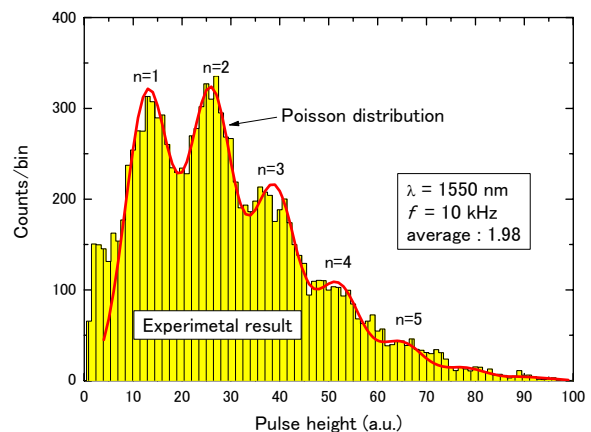


図 4 Ti-TES による光子数分布測定結果例

3. むすび

従来の超伝導転移端マイクロカロリメータによる光デバイスの常識を打ち破る高速な光子数識別技術の実現に向け、独自の超伝導体を用いた素子の開発を行った。その結果、世界最速となる 0.3 μs の応答時定数で光子数識別可能な性能を達成することが出来た。現状では、このエネルギー分解能は従来の結果には得られた値には及んでいないが、設計値では同等の値が得られるものと予測されており、今後、素子形状の最適化、読み出しノイズの低減などにより、高エネルギー分解能と高速化を両立した性能が得られるものと考えている。

【誌上发表リスト】

- [1] 福田大治, “超伝導転移端マイクロカロリメータを用いた単一光子検出技術”, 第 53 回応用物理学会関係連合講演会 (東京) 講演予稿集, p. 561 (2006 年 3 月 22 日) (招待講演)
- [2] 福田大治, “超伝導検出器: 近赤外単一光子分光検出および光放射束標準”, 第 54 回応用物理学会関係連合講演会 (相模原) 講演予稿集, p. 89 (2007 年 3 月 28 日) (招待講演)
- [3] Daiji Fukuda, R.M.T. Damayanthi, A. Yoshizawa, N. Zen, H. Takahashi, K. Amemiya, and M. Ohkubo, “Titanium based Transition Edge Microcalorimeters for Optical Photon Measurements”, IEEE Trans. on Appl. Supercon., accepted for publication, (2007).