

超伝導単一光子検出器

量子暗号通信では、情報の担い手に単一光子を利用するため単一光子検出器を必要とします。本稿ではNTT物性科学基礎研究所で開発を進めている超伝導ナノ細線を用いた高性能単一光子検出器の概要、および最近の進展や今後の展開について解説します。

しばた ひろゆき

柴田 浩行

NTT物性科学基礎研究所

単一光子検出器

究極の安全性を保つことができる次世代の光通信技術として、量子暗号通信の研究が近年さかんに行われています。従来の光通信では、情報の担い手となる光パルスには1パルス当たり数万个の光子が含まれていますが、量子暗号通信では1パルス当りの光子数が1個以下の極微弱光を利用しています。また伝送距離を伸ばすために光ファイバ増幅器を利用することもできません。なぜなら増幅すると量子暗号通信で利用している単一光子特有の量子揺らぎの性質が消えてしまうからです。このため、量子暗号通信の研究推進にはできるだけ高性能な単一光子検出器が必要となります。これまでにさまざまなタイプの単一光子検出器が開発されていますが、超伝導ナノ細線を利用した検出器は非常に高い性能を示し、近年の量子暗号通信研究では数多く利用されています^{(1), (2)}。

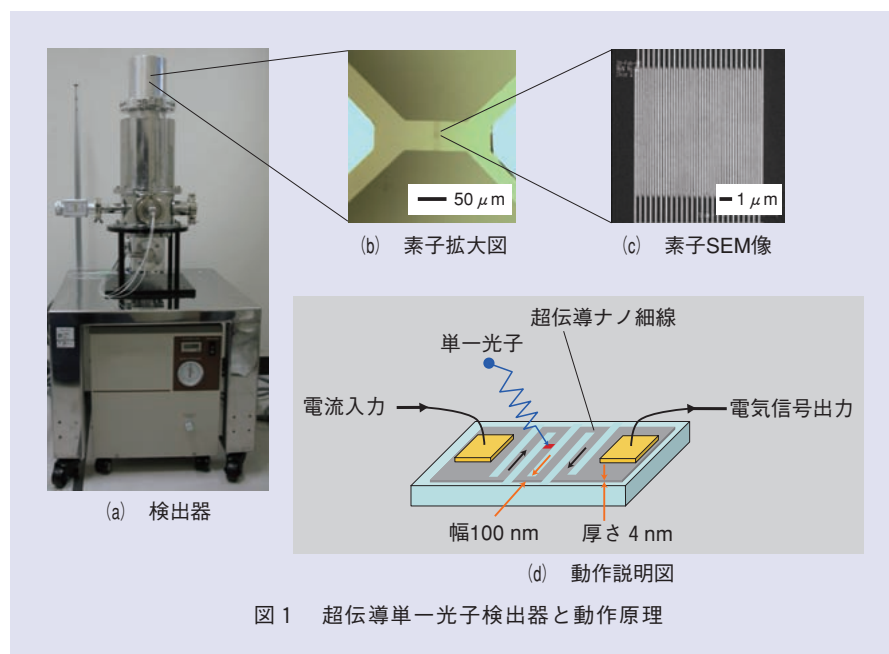
超伝導単一光子検出器

NTT物性科学基礎研究所で開発している超伝導単一光子検出器の写真を図1(a)に示します⁽³⁾。一般的に、超伝導体を用いたデバイスは、極低温に

冷却するための装置が大型で複雑な作業を必要とし、実用化を大きく損ないます。しかし、本装置は110 cm×50 cm×60 cmの大きさに収まり、一般的な19インチラックに収納することも可能です。また、冷凍機を用いているために100 V電源を入れるだけで動作し、複雑な操作は不要で3 Kまで冷却できます。光検出素子は図1(a)の円筒内部に設置された10 μm角の超伝導体で(図1(b), (c))、幅100 nm・厚さ4 nmのナノ細線からなっています。この超伝導体に光ファイバを通して極微弱

な信号光を照射します。

検出器の動作原理を図1(d)に示します。超伝導ナノ細線に電流を流すと、抵抗ゼロの超伝導状態なので電圧は生じません。単一光子がナノ細線に照射されると光子はナノ細線の一部分に吸収されます。すると吸収された点の温度が局所的に上昇し、超伝導が破壊され常伝導状態になります。ナノ細線が十分に細ければ常伝導状態が電流の通り道を完全に塞いでしまうため、細線に有限の抵抗が生じます。素子は冷却されているためすぐに温度が下が



り、元の超伝導状態に戻りますが、常伝導状態になった際の抵抗によって電圧パルスが発生し、これが電気信号になります。極微弱な1粒の光子が超伝導を破壊することは不思議に感じるかもしれませんが、単一光子が持つエネルギーは波長1.5 μm で0.83 eVですが、超伝導が有するエネルギーギャップは数meV程度とさらに小さいので、単一光子でも超伝導を局所的に破壊することができます。また、極微細なナノ細線を必要とすることから、超伝導材料の超薄膜作製技術およびナノ細線微細加工技術が超伝導単一光子検出器を作製するためのキーポイントになります。

超伝導材料

超伝導単一光子検出器に用いられる超伝導材料として、これまでNb（ニオブ）またはNbN（窒化ニオブ）が利用されてきました。これらの材料については、すでに高品質な超薄膜の成長技術、ナノ細線微細加工技術が確立しているためです。しかし、Nbの超伝導転移温度^{*1} (T_c)は9K、NbNは16Kであり、超伝導体の中でも低い T_c を有します。より高い T_c を有する材料で検出器が作製できれば高温での動作が可能となり、冷却負荷の削減による検出器の小型化・省電力化を図ることができます。

主な超伝導体の発見年と T_c を図2に示します。この図を見ると銅酸化物高温超伝導体（Cu系）や最近発見された鉄系超伝導体（Fe系）が、高い T_c を有し、有望な材料であることが分

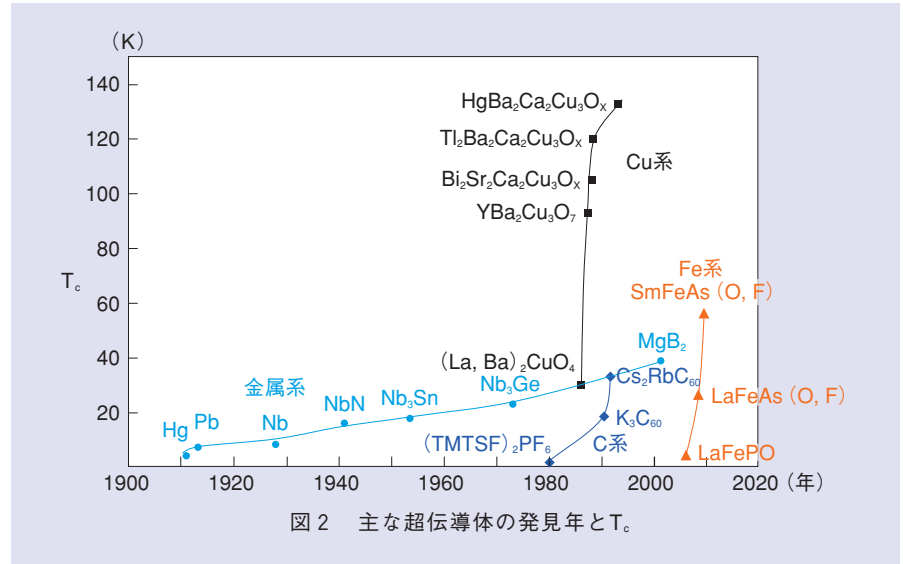


図2 主な超伝導体の発見年と T_c 。

表 主な超伝導体の物性値

超伝導材料	超伝導転移温度 (K)	磁場進入長 (nm)	電子—格子緩和時間 (ピコ秒)
Nb	9	39	370
NbN	16	200	60
MgB ₂	39	40	2
YBa ₂ Cu ₃ O ₇ (銅酸化物超伝導体)	92	200	1.1

かります。しかし、これらの材料は4～5個の元素からなる複合化合物で複雑な結晶構造を持つため、超薄膜の作製やナノ微細加工が非常に困難です。NTT物性科学基礎研究所では $T_c=39\text{K}$ のMgB₂（二ホウ化マグネシウム）に注目し、MgB₂を用いた単一光子検出器の開発に取り組んでいます⁽⁴⁾。MgB₂はCu系やFe系ほど高 T_c ではありませんが、金属・金属間化合物の中ではもっとも高い T_c を持ちます。また、2元素系であるためCu系やFe系ほどデバイス作製の困難はありません。

さらにMgB₂を用いることによって動作速度の高速化も期待できます。主な

超伝導体材料の物性値を表に示します。超伝導単一光子検出器の動作速度は、素子の構造によって決定されるインダクタンス^{*2}、および材料固有の電子—格子緩和時間、という2つのパラメータによって決まります。インダクタンスは磁場進入長の二乗に比例し、同じ素子構造の場合、インダクタンスが小さい素子の方が高速で動作します。一方、電子—格子緩和時間は短い方がより早く超伝導状態に戻るこ

*1 超伝導転移温度：特定の金属や化合物などの物質を超低温に冷却したときに、電気抵抗がゼロになる現象時の温度。
*2 インダクタンス：ある回路を貫く磁束とその磁束を生じさせている電流の比。

とができるため、高速となります。表に示したように、 MgB_2 は NbN より磁場進入長、電子一格子緩和時間共に小さいため、より高速動作可能であることが分かります。Nbと比較すると磁場進入長は同程度ですが、電子一格子緩和時間は圧倒的に小さいため、Nbより高速動作可能です。Cu系と比較すると磁場進入長はより小さいですが、電子一格子緩和時間はCu系の方が短くなっています。このことから同一素子構造の場合は MgB_2 の方が高速ですが、素子構造を工夫するとCu系の方が高速になることが期待できます。

MgB_2 ナノ細線の作製

このように MgB_2 は超伝導単一光子検出器の高温動作、高速化に有望な材料ですが、Nbや NbN と比較すると薄膜成長技術、ナノ加工技術が未熟な点が課題となります。NTT物性科学

基礎研究所ではMgとBの蒸着レート^{*3}を各々精密に制御することが可能な分子線エピタキシャル成長(MBE)装置を用いて MgB_2 薄膜を成長し、高品質な超薄膜を得ることができました。

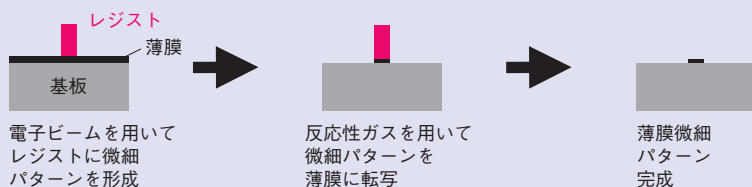
ナノ微細加工については独自の新しいプロセス手法を開発しました。一般的に用いられているナノ加工プロセスを図3(a)に示します。加工したい材料の薄膜上にレジスト(保護膜)を塗布し、電子ビーム描画・現像によってレジストを微細パターンに形成します。次に反応性ガスを用いてレジストの微細パターンを薄膜に転写します。最後にレジストを剥離して薄膜の微細パターンを完成します。この方法は材料に応じて適切な反応性ガスを選択すれば、半導体やNb、 NbN など多くの材料に適用可能です。しかし、 MgB_2 の場合、 MgB_2 を加工できる反応性ガスが見つかっていないため、本手法を適

応することができません。そこで新たに図3(b)のようなプロセスを開発しました。この方法では、はじめに基板の上にアモルファスカーボン蒸着し、その上にレジストの微細パターンを形成します。次に反応性ガス(酸素プラズマ)を用いて微細パターンをアモルファスカーボンに転写します。その後、 MgB_2 薄膜を成長させます。最後にリフトオフによってアモルファスカーボンを除去し、薄膜の微細パターンを得ます。薄膜の高温成長が不可能な一般的なリフトオフ法とは異なり、無機材料のアモルファスカーボンを使用したために、高温成長が必要な MgB_2 薄膜の作製が可能となった点がポイントです。

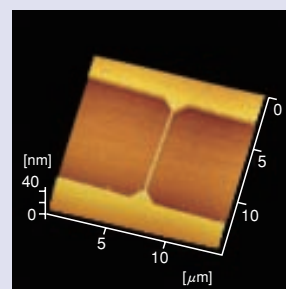
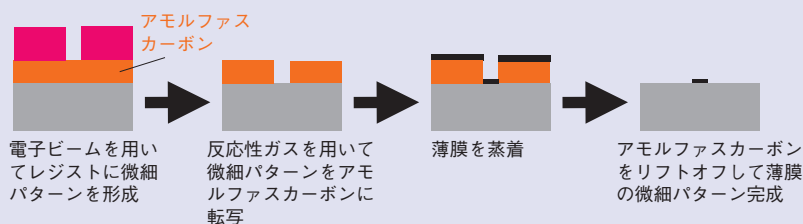
作製した MgB_2 ナノ細線の原子間力顕微鏡(AFM)像を図3(c)に示します。幅100 nm、高さ10 nm、長さ10

*3 蒸着レート：蒸発源より蒸発した元素が基板上に薄膜として接着する時の蒸発速度。

(a) 従来の微細加工プロセス



(b) 新たに開発した微細加工プロセス



(c) MgB_2 ナノ細線のAFM像

図3 ナノ微細加工プロセスと MgB_2 ナノ細線

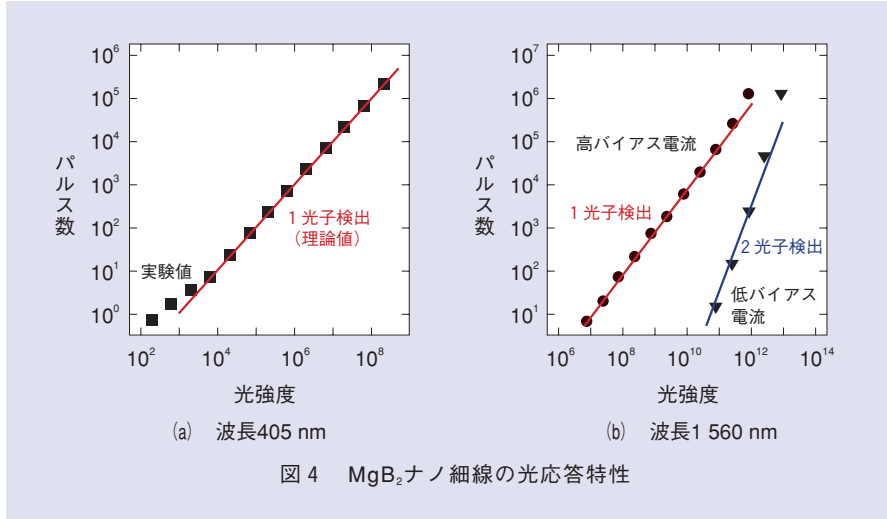


図4 MgB₂ナノ細線の光応答特性

μmの均一な単一ナノ細線が得られていることが分かります。また、電気伝導特性を測定し、細線の超伝導特性が微細加工によって劣化していないことを確認しました。

MgB₂ナノ細線の単一光子検出

得られたMgB₂ナノ細線の光応答特性を図4に示します。レーザー光の1パルスに含まれている光子数はポアソン分布^{*4}をしていることが知られており、極微弱光下では1パルス当たり1個の光子が含まれている確率は平均光子数、すなわち光強度に比例します。したがって、1パルス当たり1光子の検出が可能な単一光子検出器では、検出器からの電気パルス数は光強度に比例するはずで

実際、波長405 nmでは実験値は理論値によく一致しておりMgB₂ナノ細

線は単一光子検出可能であることが分かります(図4(a))。波長1560 nmでは、低バイアス下では電気パルス数は光強度の二乗に比例しています。これは、波長1560 nmでは光子1個の持つエネルギーが低いため、低バイアス下では1パルス当たり1個の光子が含まれる場合は検出できず、2個の光子が含まれている場合に検出していることを表しています。しかし、バイアス電流を高くすると電気パルス数は光強度に比例し、波長1560 nmにおいても単一光子検出可能となります。これらの結果から、MgB₂ナノ細線は単一光子検出器として非常に有望であることが実証できました。

今後の展開

量子暗号通信の実現に向けて、超伝導単一光子検出器のさらなる小型化・省電力化・高性能化に取り組みます。

参考文献

- (1) H. Takesue, S. W. Nam, Q. Zhang, R. H. Hadfield, T. Honjo, K. Tamaki, and Y. Yamamoto: "Quantum key distribution over a 40-dB channel loss using superconducting single-photon detectors," *Nature Photonics* 1, pp.343-348, 2007.
- (2) T. Honjo, S. W. Nam, H. Takesue, Q. Zhang, H. Kamada, Y. Nishida, O. Tadanaga, M. Asobe, B. Baek, R. Hadfield, S. Miki, M. Fujiwara, M. Sasaki, Z. Wang, K. Inoue, and Y. Yamamoto: "Long-distance entanglement-based quantum key distribution over optical fiber," *Opt. Express*, Vol.16, No.23, pp.19118-19126, 2008.
- (3) T. Seki, H. Shibata, H. Takesue, Y. Tokura, and N. Imoto: "Comparison of timing jitter between NbN superconducting single-photon detector and avalanche photodiode," *Physica C*, Vol.470, No.20, pp.1534-1537, 2010.
- (4) H. Shibata, T. Takesue, T. Honjo, T. Akazaki, and Y. Tokura: "Single-photon detection using magnesium diboride superconducting nanowires," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 97, No.21, 212504, 2010.



柴田 浩行

超伝導体は高性能化・省電力化に最適な材料ですが、冷却負荷が大きい点が課題です。高温動作によって超伝導材料がさまざまな分野で利用される社会の実現に向けて取り組みます。

◆問い合わせ先

NTT物性科学基礎研究所
量子光物性研究部
TEL 046-240-3150
FAX 046-240-4726
E-mail shibata.h@lab.ntt.co.jp

*4 ポアソン分布：統計学および確率論において、所与の時間間隔で発生する離散的な事象を数える特定の確立変数Xを持つ離散確立分布のこと。