

プロジェクト名：非平衡超伝導現象を用いた量子情報通信用高速単一光子検出器

プロジェクト代表者：明連広昭（大学院理工学研究科・教授）

## 1 はじめに

今後利用が期待されている量子情報通信は、電子や光などの「粒子」の性質を利用して情報を処理・伝送しようとする技術である。この量子情報通信では、単一光子発生源と単一光子検出器の研究が重要性を増してきている。超伝導単一光子検出器は、数 nm の厚みの超伝導薄膜を超微細加工技術により幅 100nm 程度のナノワイヤ状に加工した検出器で、多くの場合検出面積を大きく取るためにミアンダパターンとされる。光子がナノワイヤに照射されると、超伝導状態が破壊されたホットスポットによりナノワイヤ端の電流密度が増加し、最終的にナノワイヤが常伝導（有限電圧）状態に遷移することで単一光子の検出を行う。光スイッチとしての応答速度は、超伝導状態から常伝導状態への遷移時間と常伝導状態から超伝導状態への復帰時間の和であるが、後者の復帰時間が長く応答速度はほぼ後者の高速化により実現される。この応答速度は超伝導材料と基板の組み合わせなどから決定され、10Gbps 程度になることが期待され。

本研究では、超伝導/強磁性積層薄膜構造を用いることにより発現する非平衡超伝導状態を積極的に利用することにより、超伝導材料に固有な物理パラメータを操作し、従来の超伝導単一光子検出器に期待されるスイッチング速度を越える性能を持った単一光子検出器を実現することを目的とした。

## 2 超伝導/強磁性積層薄膜構造を用いたミアンダパターンの作製

超伝導薄膜は、MgO 単結晶基板の上にエピタキシャル成長した膜厚 4~10 nm 程度の NbN 薄膜を用い、強磁性体薄膜には Ni-Cu(52:48 atm %)ターゲットの直流マグネトロンスパッタによる 3~20 nm の薄膜を用いた。得られた強磁性体薄膜の組成は、X 線回折分析から求められる格子定数に Vegard 則を適用して求め、Ni:Cu =68:32 程度となることがわかった。この結果、3 nm 程度の NiCu 薄膜を NbN 薄膜上に積層すると NbN 薄膜の超伝導転移温度は 10 K 程度から 6 K 程度まで減少した。

NbN 薄膜の加工は、エッチングガスとして CF<sub>4</sub> ガスを用いることにより容易に行うことが可能であるが、NiCu 薄膜はフッ素系 (CF<sub>4</sub> および SF<sub>6</sub>) のエッチングガスでは 2~3 nm/min 程度のエッチング速度しか得られないことが判明した。一方、Ar ガスによる物理エッチングを用いた場合を Fig.1 に示す。図からわかるように、およそ 30 nm/min 程度の高速なエッチング可能であることがわかった。

MgO 単結晶基板の上に堆積した NbN(8 nm) / NiCu(0~10 nm) 薄膜を、電子線描画法と上記の Ar ガスによる物理エッチングと CF<sub>4</sub> ガスを用いた反応性エッチング法を用いて NbN/NiCu のナノワイヤ構造に加工した。次に、通常の写真リソグラフィ法と Ar ガスおよび CF<sub>4</sub> ガスを用いたエッチング法により、特性インピーダンス 50Ω のコプレーナ線路がナノワイヤ構造で接地されてい

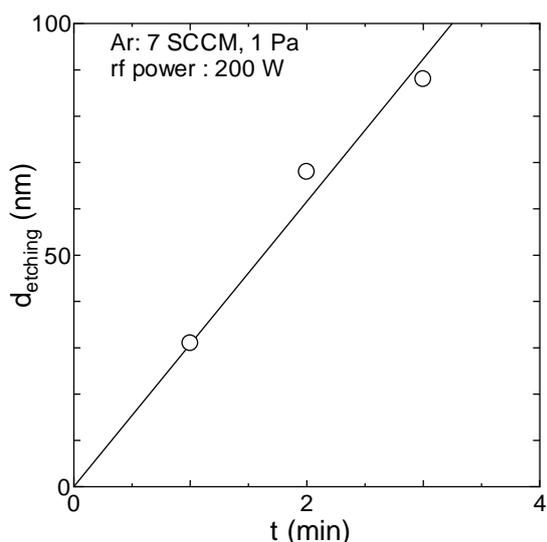


Fig. 1 Time dependence of etching depth of NiCu films with Ar ion etching method.

る構造の素子を作製した。Fig. 2は、コプレーナ線路が線幅400 nmのナノワイヤ構造で短絡している部分の顕微鏡写真を示す。ナノワイヤ構造によるミアンダパターンはおおよそ $16 \times 20 \mu\text{m}^2$ 角程度となるように設計した。また、ナノワイヤの持つインダクタンスによる時定数を減少するため、ナノワイヤ3本の平行構造とした。

線幅400~500 nmのNbN(10 nm)/NiCu(3~10 nm)の素子において4.2 Kにおける電流-電圧特性を測定したところ、NiCu薄膜の膜厚が増大すると、臨界電流が減少し、一方電流-電圧特性上のヒステリシスが消滅することが確認された。

これらの素子を用いて、波長850 nmのVCSELからのパルスレーザー照射に対する高速応答特性の測定を4.2 Kにおいて行った。図3は、パルスレーザー照射に対する高速応答特性の測定結果の一部を示している。線幅500 nmのNbN(10 nm)/NiCu(10 nm)の素子においてパルス繰り返し周波数100 MHz、パルス幅1~2 nsのパルスレーザー照射に対して応答することが確認された。応答速度は、幅150 nmのNbN(8 nm)のナノワイヤと同程度であり、今後、ナポリ大学で行っているフェムト秒レーザーを用いた時間分割反射率測定とあわせてNiCu強磁性体薄膜の効果を明らか

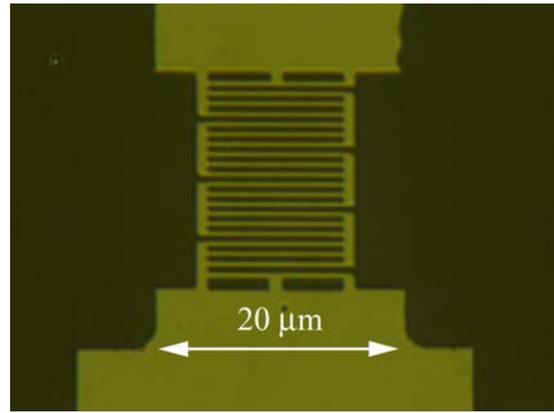


Fig. 2 Micrograph of 400-nm-wide 3 parallel nanowire with co-planar transmission line.

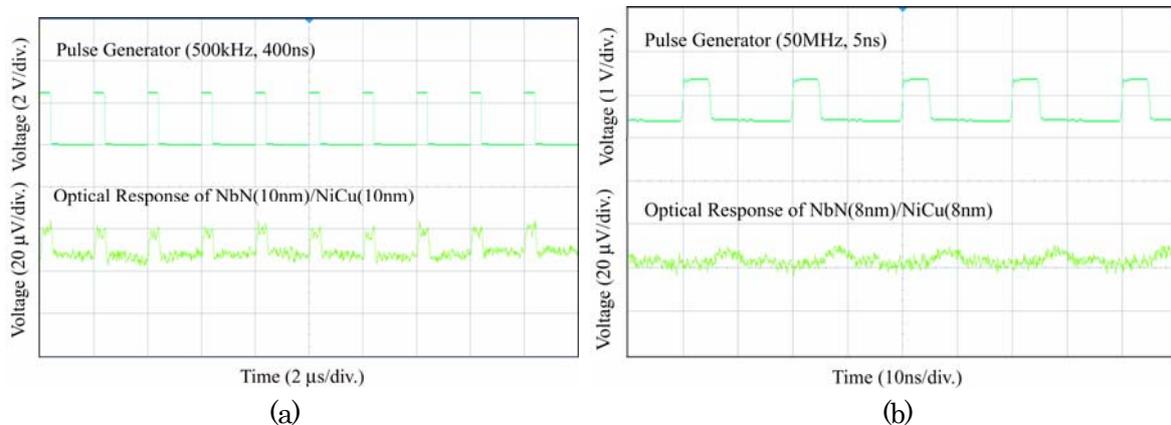


Fig. 3 High-speed optical response of (a) NbN(10nm)/NiCu(10nm) for 500 kHz, 400 ns-wide laser pulses and (b) NbN(8nm)/NiCu(8nm) for 50 MHz, 5 ns-wide laser pulses.

にしていく必要がある。

### 3 まとめ

MgO単結晶基板上に堆積したNbN/NiCu薄膜を用いて、電子線描画法と通常のフォトリソグラフィ法を用いてNbN/NiCuのナノワイヤ構造により特性インピーダンス $50 \Omega$ のコプレーナ線路が接地されている素子を作製し、波長850 nmのVCSELからのパルスレーザー照射に対する高速応答特性の測定を行った。線幅500 nmのNbN(10 nm)/NiCu(10 nm)の素子においてパルス繰り返し周波数100 MHz、パルス幅1~2 nsのパルスレーザー照射に対して応答することが確認された。これは、通常のNbNのナノワイヤ素子と同程度の応答速度である。NiCu強磁性体薄膜の効果を確認するためには、今後詳細な実験が必要であると考えられる。