

# AI 系 STJ 素子を用いた超高性能フォトン検出器の作製に関する研究

## Fabrication of high quality photon detector using Al-based STJ

プロジェクト代表者：田井野 徹（工学部・助手）

Tohru Taino (Faculty of Engineering・Research Associate)

### 1 はじめに

現在実用化されている半導体を用いたフォトン検出器は、医療分野での患部イメージング、産業分野での材料診断、理学分野での天体観測など実社会及び先端的研究においてなくてはならないデバイスとして利用されている。半導体検出器と比較して、エネルギー分解能が数十倍以上優れた検出素子として各業界の期待を背負っているのが、超伝導トンネル接合素子（Superconducting Tunnel Junction : STJ）を用いたフォトン検出器である。STJ素子は、優れたエネルギー分解能・高計数率・広帯域を特徴に持つ。具体的には、エネルギー分解能はSTJ素子作製に選択する材料によって異なる。例えばこれまで研究が進められている主な超伝導材料であるNbを利用したSTJ素子の場合、理論的に4eVの分解能が算出されるが、実際に作製されたNb系STJ素子の実験データでは20数eVにとどまっている。※半導体検出器の理論的なエネルギー分解能は約130eVである。

本研究では、従来使用されてきた Nb に代わる超伝導材料として Al に着目する。世界的には Nb 系 STJ 素子を用いた検出器開発が進められているが、STJ 素子を用いたフォトン検出におけるエネルギー分解能の世界最高記録は Al 系 STJ 素子の 12eV である。その結果にも関わらず、世界の研究潮流からはずれているのは、Al という材料の持つ加工のしにくさに起因する。STJ 素子は、基本的に半導体プロセスと同様の行程を経て作製される。半導体プロセスラインでも問題になっているのが、この Al の加工である。エッチングによる薄膜の加工は、エッチング用ガスと薄膜材料とを化学的に反応させてガス化する。しかしながら Al は化学的に反応をすることがないため、物理的に加工せざるを得ない。この場合、1)エッチングスピードが急激に落ちること、2)エッチング時間の増加は STJ 素子自体にエネルギーを加えることと等価で、その結果素子特性が劣化すること、3)物理的エッチングに依存することから、加工面が粗い、などの不具合が生じる。これが、Al 系 STJ 素子が敬遠される大きな理由である。当研究室で保有するエッチング装置は、エッチングガスを基板の一部に局所化することができることから Al エッチングスピードも、他機関と比較して約 10 倍早い。これを生かし、世界最高性能をもつSTJ 素子作製方法の確立を目指す。

### 2 Al 系超伝導トンネル接合

フォトンを計測する検出器は、これまで主に半導体検出器が用いられてきた。しかしながら、半導体検出器は既に半導体材料固有の性質により、今まで以上の性能の向上は望めず、現状のままで先端的な研究開発は望めない。更なる研究、応用分野を切り拓くツールとなる超伝導フォトン検出器は、半導体検出器と比較して高分解能・高速・広帯域を特徴とする検出器として、現在までに優れた実験データを多数示している。各種検出器の特徴を以下に示す。

表1 各種フォトン検出器の特徴

検出器	エネルギー分解能 (実験データ)	カウントレート (速度)	エネルギーレンジ (エネルギー帯域)
シンチレータ	数 100 eV	数 10000 cps	数 10 keV 以上
半導体検出器	130 eV	3000 cps	数 eV から数 MeV
超伝導検出器	30 eV (Nb 超伝導体)	10000 cps	数 eV から数 MeV

優れた特徴を有する超伝導フォトン検出器は、原理上、超伝導体内のクーパー対を崩壊するだけのエネルギーが入射されると励起電子（準粒子）が発生して、この準粒子を信号として収集する。ここで、収集できる準粒子数が多ければ多いほど、エネルギー分解能の向上が見込まれる。例えば 1 つのクーパー対を崩壊するために必要なエネルギーを $\epsilon$ とすると、大きさ  $E$  のエネルギーが超伝導トンネル接合素子に入射された場合、検出器が収集できる電荷数は  $E/\epsilon$  で表される。すなわち、 $\epsilon$  が小さければ小さいほど多くの電荷を収集することができる。ここで、 $\epsilon$  は超伝導体材料によって異なることが知られている。表 2 に代表的な超伝導材料の物性値を示す。表 2 に示すとおり、 $\epsilon$  が最も小さい超伝導体材料は Al であることが分かる。超伝導電極材料に Al を用いた場合、理論的に算出されるエネルギー分解能は約 2 eV であり、半導体検出器の理論エネルギー分解能 130 eV を遙かに凌駕する。またコヒーレンス長は、エネルギーギャップの空間的均一性の指標となる値で、大きければ大きいほどエネルギーギャップの揺らぎが小さい。この揺らぎが大きい場合にはエネルギー分解能の悪化につながる。時定数とは、エネルギーが付与されることで生成された準粒子の相互作用の頻度を示す値である。この値が大きければフォノンとの相互作用が起こりにくくなる。また Al 系超伝導トンネル接合素子は、素子検出動作時に必要な磁場の大きさが、Nb 系超伝導トンネル接合素子の場合と比較して 10 倍ほど小さい、10 gauss 程度でよい。これらの観点からも超伝導トンネル接合素子に Al を用いることで、様々なアドバンテージが見込まれる。

表2 各種超伝導材料の物性値

	Al	Sn	Nb
エネルギーギャップ	0.34 meV	1.15 meV	3.05 meV
コヒーレンス長	1.6 $\mu\text{m}$	0.23 $\mu\text{m}$	0.038 $\mu\text{m}$
転移温度	1.19 K	3.75 K	9.2 K
時定数	438 nsec	2.3 nsec	0.149 nsec
5.9 keV のエネルギーを入射した際の総電荷数	$1.74 \times 10^7$ 個	$6.1 \times 10^6$ 個	$2.3 \times 10^6$ 個

### 3 作製した素子の特性

今回、これまで行われてこなかったフォトリソグラフィ技術による Al 系超伝導トンネル接合素子の作製に初めて成功した。Al 膜の加工は非常に困難であったが、我々は高密度プラズマエッチングを採用することで Al 膜を削り素子作製ができた。この時に Al 膜のエッチングレートは 20 nm/min. で、従来のデータより 10 倍優れていることが分った。またエッチングレートの向上に伴い、加工できる Al 膜厚は 100 から 300 nm となり、デバイス作製が可能になった。更に、従来 Al 系超伝導トンネル接合素子作製に用いることができなかったフォトリソグラフィ技術を採用することで、素子の微細パターン化にも成功した。

図 1 がフォトリソグラフィ技術を用いて作製した、Al/AIO<sub>x</sub>/Al 超伝導トンネル接合素子の顕微鏡写真である。同図に示すとおり、素子は正規分布形状で、パターンの最小線幅は 1 $\mu$ m である。この限界については所有する露光器の精度に依存するが、フォトリソグラフィ技術を用いた Al 膜の加工を行うことで、微細パターンが作製できることが分かる。

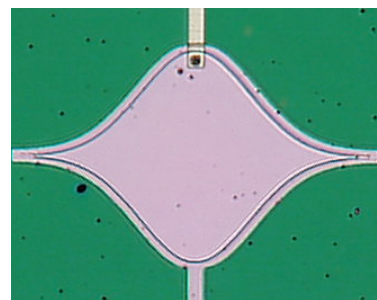


図1 作製した素子の顕微鏡写真

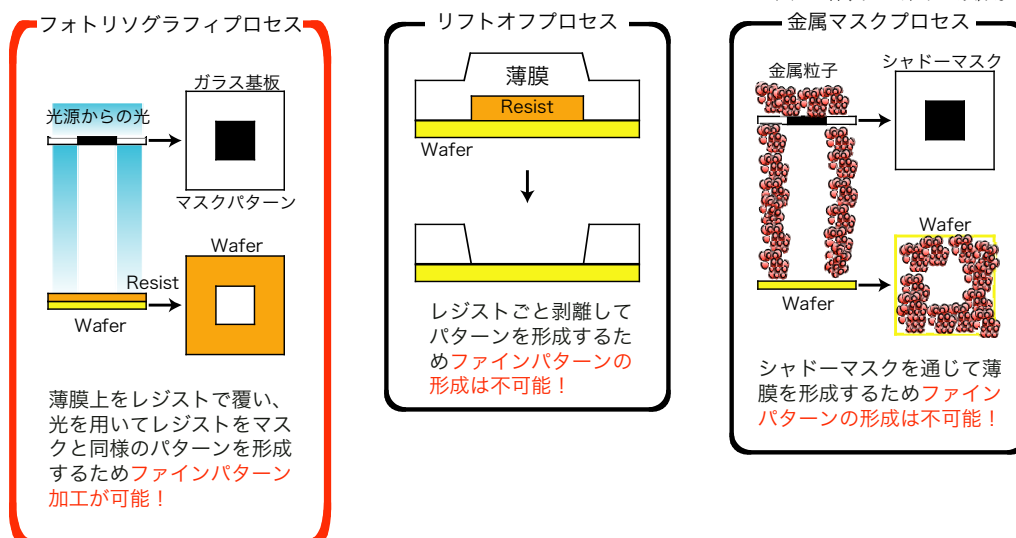


図2 フォトリソグラフィ、リフトオフ、金属マスクプロセスの概念図

図 2 に、従来の Al 系超伝導接合素子作製行程との比較を示す。同図に示すように、リフトオフ行程や金属マスクによる作製を使わない、フォトリソグラフィ行程での作製を行うことで微細パターンの作製が可能となった。

作製した Al 系超伝導トンネル接合素子を用いて、動作温度 0.4K において電流-電圧特性の観測を行った。その結果を示すのが図 3 である。同図に示すとおり、作製した素子はきれいな特性を示すことから、フォトリソグラフィ技術を用いた作製に成功したことが分かった。

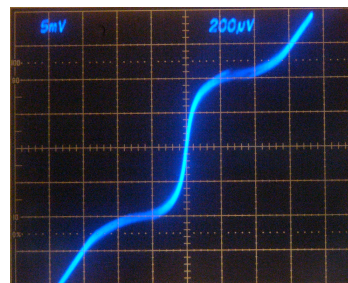


図3 作製した素子の電流-電圧特性

縦軸：電流  $\mu$ A/div、横軸：電圧  $\mu$ V/div.

#### 4 まとめ

超高性能フォトン検出器として Al 系 STJ 素子に着目し、フォトリソグラフィ技術を用いた精密素子の作製に成功した。また極低温測定を行い、素子特性を得ることで、今後の Al 系 STJ 素子作製の指針を得た。

謝辞：本プロジェクトによって、下記の成果を挙げることができたと共に今後の指針を得ることができたことを感謝いたします。また本プロジェクトを推進するに当たり、高田進教授、明連広昭助教授、阿佐真一君、ファイザ君、鎌田幸佑君、産総研・仲川博主任研究員、菊地克弥研究員、青柳昌宏主任研究員に感謝いたします。

#### 本プロジェクトにおける成果

・口頭発表：1 件（応用物理学会）、特許出願：1 件、論文：現在執筆中