

単結晶・超伝導トンネル接合の創製とテラヘルツ光デバイス応用

有吉 誠一郎¹、濱尾 俊幸^{1,2}、田井野 徹^{1,2}、古賀 健祐^{1,3}、大谷 知行^{1,3}

¹理研 テラヘルツイメージング研究チーム、²埼玉大 理工学研究科、³東北大 理学研究科

【はじめに】

電波と光波の境界領域に位置するテラヘルツ光は、物質に対する透過性と吸収スペクトルを利用した物質同定性を併せもつなど、他の波長帯には見られない特長を有し、産業分野における各種非破壊検査、医療応用や天文観測研究など、様々な分野での利用が期待されている。しかし、このバンドで大規模なイメージング計測を行うために必要な検出技術は未開拓であり、超高感度・広帯域・大規模アレイ性能を兼ね備えた先端的な検出デバイスが強く望まれている。そこで我々は、テラヘルツ領域での1光子検出を最終目標として、単結晶・超伝導トンネル接合素子(STJ)の創製を目指している(表1)。具体的には、従来の多結晶成膜法(スパッタ法)に代わり、単結晶成膜法(分子線エピタキシー法)を導入し、原子層レベルで平坦なトンネルバリア界面を形成することで超低雑音特性(=低い漏れ電流特性)をもつ素子の作製技術開発を進めている。この成膜技術の確立により、従来の金属表面を酸化するといった自然任せのデバイス作製手法ではなく、単結晶積層によって高度に制御することが可能となる。また、絶縁体内の原子の並び方が規則的になり超伝導体内の電子の波動関数が散乱によって乱されなくなると予想されるため、未踏光テラヘルツ領域において、究極感度の検出デバイス実現へ不可欠な基盤技術の創出になると期待される。

表1 本研究のねらい

	従来の成膜法 (スパッタ法)	新しい成膜法 (分子線エピタキシー法)
薄膜構造	多結晶	単結晶
バリア界面	バリア欠陥あり	完璧なトンネル障壁
電気特性	残留漏れ電流あり ⇒雑音：大	残留漏れ電流なし ⇒雑音：小

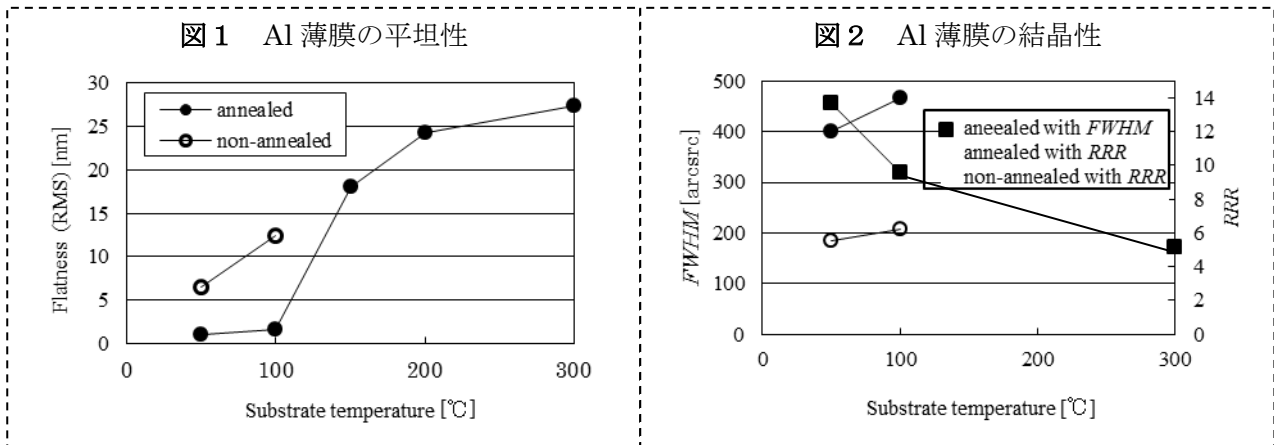
一般に、素子の漏れ電流の要因には(冷却すると下がる)熱励起電流の成分と、(冷却しても下がらない)バリア欠陥による電流成分の2種類がある。本研究のねらいはこの後者の起源を解明し、光デバイスの新たな応用分野を切り拓くことにある。

以下では、超伝導体材料としてAlとNb膜のエピタキシャル成長条件について述べる。Alは低い超伝導転移温度 T_c (1.2K)をもつため、極低温冷却が必要なものの光検出の下限周波数はミリ波領域($>0.1\text{THz}$)を含む広帯域特性が期待される。一方、Nbは比較的高い T_c (9.2K)をもつため、下限周波数がテラヘルツ領域($>0.7\text{THz}$)に限られるものの市販の4K冷凍機で比較的簡便に評価可能という利点がある。

【Al単層膜の作製と評価】

Al成膜にはSi(111)基板を用い、基板表面の酸化膜を除去するために成膜前に基板を 700°C で10分間アニール処理を施した。その後、室温 $\sim 300^\circ\text{C}$ の様々な温度条件の下、 1080°C に加熱したクヌーセンセルを用いて各60分間(約100nm厚)成膜した。また、比較のためにアニール処理を施さ

ない基板上に室温と 100℃の基板温度で Al 成膜を行った。図 1 に基板温度と膜平坦性の関係を示す。なお、膜平坦性の評価に際しては原子間力顕微鏡を用いて薄膜の凹凸形状を測定した。同図より、基板温度が低いほど、また同じ基板温度ではアニール処理を施した基板の方が膜平坦性に優れていることが分かる。次に、基板温度と結晶性の関係を図 2 に示す。結晶性の評価に際しては、結晶中の不純物や格子欠陥量の指標となる残留抵抗比 (RRR)、および X 線回折装置を用いたピーク半値幅 (FWHM) を測定することで多角的に評価した。同図より、基板温度が高いほど、また同じ基板温度ではアニール処理を施した基板の方が結晶性に優れていることが分かる。以上より、平坦性と結晶性の両立の観点から Al 成膜時の基板温度は 100℃前後が適していることが分かり、現在これらの成膜条件を用いた Al 系 STJ 素子の試作を進めている。



【Nb 単層膜の作製と評価】

Nb 成膜には R 面サファイア基板を用い、100～1200℃の様々な温度条件の下、E 型電子銃を用いて各 50nm 成膜した。図 3 に基板温度と膜平坦性の関係を示す。同図より、約 300～1000℃の範囲では基板温度によらずほぼ一定の優れた膜平坦性を有することが分かる。次に、基板温度と結晶性の関係を図 4 に示す。成膜したサンプルは 4K 冷凍機システムに設置・冷却し、RRR と T_c を同時計測することで結晶性を評価した。同図より、基板温度 1000℃で結晶性が最も優れていることが分かる。以上より、平坦性と結晶性の両立の観点から Nb 成膜時の基板温度は 1000℃前後が適していることが分かった。

ここで述べた測定結果をもとにして、今後は STJ 検出器や力学インダクタンス検出器 (MKID) などのテラヘルツ光検出デバイスを作製し、その検出性能を実験的に明らかにする予定である。

