

報告番号	※ 甲	第 3191 号
------	-----	----------

主 論 文 の 要 旨

論文題目 集束イオンビームを用いたサブミクロン
Nb/AlO_x/Nbトンネル接合作製技術に関する研究
氏 名 赤 池 宏 之

論 文 内 容 の 要 旨

本論文は、集束イオンビーム (FIB) を用いた独自の微細加工技術を使って、サブミクロン Nb/AlO_x/Nb トンネル接合の作製について検討を行ったものである。

Nb/AlO_x/Nb トンネル接合は、超伝導エレクトロニクスにおいて中心となるジョセフソン素子のなかで最も重要な素子の一つである。この接合は、理想的な電流-電圧特性を示すと同時に、温度サイクル耐性や再現性において極めて優れた特性を持つからである。それゆえ、この接合を用いることにより、ジョセフソン素子によって構成される超伝導デバイスは、その性能を大きく改善することができた。

しかしながら、社会の情報化及びハイテク化に伴って、超伝導エレクトロニクスに対する要望は益々強く、さらに超伝導デバイスの性能改善が求められている。そのためには、どうすれば良いのか。その問いに対する答の一つが、エネルギーギャップの大きい高温酸化物超伝導体を用いた優れた特性をもつジョセフソン素子を開発し超伝導デバイスへ応用することであろう。その他の答としては、既存のジョセフソン素子の高機能化である。つまり、Nb/AlO_x/Nb 接合について言うならば、接合サイズを小型化し、臨界電流密度を高めることである。

Nb/AlO_x/Nb 接合をはじめとするジョセフソン素子の小型化および高臨界電流密度化が叫ばれてから久しい。しかし、現状は、接合サイズにおいては 1 μm 以上で、臨界電流密度では 10 kA/cm² 以下が主流となっている。その理由は、素子作製技術上にブレイクスルーを必要とするいくつかの課題があったからである。高品質高臨界電流密度三層膜成膜技術、接合上部電極形成技術、絶縁分離技術が、それである。

本研究は、このような背景のもと、上部電極形成技術に関する検討を中心に、行われた。上部電極形成プロセスは、接合の電気的特性を決定するため、臨界電流の均一

性が動作マージンに直接影響する集積回路においては、非常に重要なプロセスとなり、高精度な微細加工技術が要求される。そこで、本研究では、高い加工精度を持つことが期待される F I B を用いた新しい N b の微細加工技術を提案し、この微細加工技術を上部電極形成プロセスへ応用すること、および、その有効性についての検証を行った。その結果、少なくとも $0.5 \mu\text{m}$ 角までの接合を特性を劣化させることなく作製できたこと、 $0.7 \mu\text{m}$ 角の接合の臨界電流均一性評価において良好な結果を得られたことなどから、この微細加工技術の有効性が示された。

本論文は 6 章から成る。以下に、各章の概要を記す。

第 1 章では、本研究の背景および目的について述べた。まず、ジョセフソン素子の特徴および N b / A l O x / N b 接合の重要性を述べた後、超伝導デバイスの高性能化に対する接合小型化に必要性について説明した。次に、接合を小型化する際に生じる作製技術上の問題を整理することにより、本研究のとるべき立場を明かにした。また、微小接合作製技術開発の現状についても述べた。

第 2 章では、集束イオンビームを用いた新しい N b の微細加工法である F I N P (Focused-ion-beam Implanted Niobium Patterning) 法を提案した。この加工法は、G a イオンビームを用いて N b に直接パターンを描画し、ふっ素系ガスを用いた反応性イオンエッチング (R I E) を行うことによってパターンを形成するプロセスであった。

まず、この方法の基本特性として G a - F I B の照射された N b の R I E におけるエッチング特性および超伝導性の評価を行い、続いて、N b / A l O x / N b トンネル接合作製プロセスにおける上部電極形成工程への適用を検討した。その結果、F I B のビームエネルギーを低くすることにより、F I B の照射された N b の R I E に対する十分なエッチング耐性が、高ガス圧、低入力パワーの条件下で得られること、エッチング耐性の得られるメカニズムは、注入された G a イオンがふっ化することによりエッチングマスクとして機能することがわかった。超伝導性の評価においては、臨界温度 T_c の低下は 1 K 以下とほんのわずかであり、また、F I B の影響は照射された N b の表面層に集中していることがわかった。一方、接合作製においては、ビームエネルギーの低下にともない、F I B 照射によるトンネル障壁への影響はほとんど無視できるようになり、50 mV を越える V_m 値 (接合の準粒子特性におけるリーク電流を少なさを示すパラメータ) を持つ高品質な接合を作製できることがわかった。また、 $0.3 \mu\text{m}$ 角の N b パターンのアレーを作製することにより、F I N P 法が高い加工精度を持つことを示した。ただし、垂直エッジプロファイルおよび十分なエッチング耐性の両立が F I N P 法の課題として提示された。

第 3 章では、F I N P 法におけるエッジプロファイルの制御についての検討を行った。サブミクロン接合を作製する際、上部電極のエッジプロファイルは、接合特性に大きく影響するため、極めて重要であり、それを制御しなければならない。第 3 章では、このことを念頭に、F I N P 法の課題であった垂直エッジプロファイルおよび十分なエッチング耐性の両立の実現を目指した。まず、F I N P 法に適した垂直エッジ

プロファイルを実現するための方法を検討した。Nbとふっ素系プラズマ中のFラジカルとの反応が自発性であることから、Fラジカルがアンダーカットの要因となる。そこで、プラズマ中のFラジカルを減少させれば良いと考え、ローディング効果を適用することを考案した。実験として、まずメタルマスクを用いて、エッジプロファイルの制御をCF₄とSF₆について検討した。その結果、CF₄においてのみ垂直エッジプロファイルが実現した。このことは、エッジプロファイルの改善には、Fラジカルの減少だけでなく、側壁保護効果が重要な役割を果たしていることを明白にした。CF₄ではFラジカルの減少によりフロロカーボン膜が生成し側壁保護膜として作用したのに対し、SF₆では側壁保護膜となるものが生成されないのである。この結果を踏まえ、FINP法におけるエッジプロファイル制御を試みた結果、十分なエッチング耐性および垂直エッジプロファイルの実現に成功した。

第4章では、サブミクロン接合作製上の課題となる絶縁分離技術の確立を目的に、SiO₂絶縁膜の堆積およびArイオンミリングによるエッチバック平坦化技術の検討を行った。エッチバックプロセスにおいて問題となる終点検出は、試料表面を陽極酸化すること、及び、SiO₂膜と平坦化用レジストとの間にAg薄膜をもうけ、それらを終点検出用マーカーとして利用することにより、この点を解決した。エッチバックプロセスの平坦性は、SiO₂膜の段差被覆性に依存し、バイアススパッタリング法をSiO₂膜の堆積に用いることにより、良好な平坦性が得られた。これらの結果、接合の絶縁分離に充分使用可能な制御性及び平坦性を実現した。バイアススパッタリングによる堆積は、試料の温度を上昇させやすく、また、プラズマによる損傷を与えやすいため、接合特性を劣化させることがわかった。しかし、これについては、試料の冷却を充分行うとともに、絶縁層堆積の最初にノンバイアスでSiO₂を薄く堆積させ、バイアススパッタ膜に対する保護層として機能させる方法を見出し、接合特性の劣化を防ぐ手法を開発した。

第5章では、FINP法をNb/AlO_x/Nbトンネル接合の上部電極形成プロセスに応用してサブミクロン接合を作製し、その特性評価を行った。その結果、通常のNb/AlO_x/Nb三層膜を用いて作製した場合、0.5 μm角の接合まで作製することができた。また、臨界電流均一性の評価では、60個直列接続された0.7 μm角の接合において、最大最小で±10%とかなりばらつきの小さいもの得られた。これらのことから、FINP法が微小接合の形成法として優れた方法であることが示された。一方、3 μm角のフォトリソグラフィーを用いて作製した接合の特性と比較したとき、R_g/R_{nn}（接合のサブギャップ抵抗R_gと常伝導抵抗R_{nn}との比で、ギャップ電圧での立ち上がりの大きさを表すパラメータ）が2/3倍以下に低下しており準粒子特性においてリーク電流の上昇が見られたこと、および、歩留まりが高くないことなど課題が残った。この課題を解決するため、作製した接合のチップ内での特性のばらつきを検討したところ、接合サイズが小さくなるに従い特性が劣化するものと、接合サイズによらずほとんど同じように劣化しているものの2種類存在することがわかった。前者は、上部Nb電極のRIEによる加工時に生じるストレス緩和に

よりトンネル障壁が破壊されることによると推測された。また、後者の場合は、FIB照射によるトンネル障壁への影響ではないかと考えられた。そこで、上部電極をNb/AI/Nb構造にし、下部電極を含めてNb/AI/Nb/AIO_x/Nb五層構造にすることにより、接合特性の改善を試みた。AIはFIB照射およびストレス緩和に対する緩衝層として働かせることをねらったものである。作製した接合は、0.5 μm角のものにおいて特性劣化はみられず、AI緩衝層が有効に機能したと考えられる。このようにAI緩衝層を用いることによりプロセスの影響を低くできるため、臨界電流のばらつきをさらに低くできる可能性があり、FINP法の有効性がさらに高まるだろうと考えられる。

第6章は総括であり、第5章までの要約を行うと共に今後の課題について述べた。今後の課題としては、サブミクロン接合作製の歩留まりの向上、FINP法によって作製可能な接合サイズの限界値の見極め、サブミクロン接合を用いての超伝導デバイスの作製及び特性評価の三点を挙げた。