

氏 名	宇 佐 美 興 一
授 与 学 位	博 士 ( 工 学 )
学位授与年月日	平成 5 年 11 月 10 日
学位授与の根拠法規	学位規則第 5 条第 2 項
最 終 学 歴	昭 和 43 年 3 月 電気通信大学大学院電波通信学専攻修士課程修了
学 位 論 文 題 目	エネルギーを制御した薄膜イオンプロセスの トンネル接合素子作製への応用
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 小野 昭一 東北大学教授 大見 忠弘 東北大学教授 山下 努 東北大学助教授 横尾 邦義

## 論 文 内 容 要 旨

最近の薄膜技術ではイオンを用いた各種のプロセスが利用されているが、本論文はまず始めにスパッタリング法を例にとり、このイオンを用いたプロセスの低エネルギー化とエネルギー制御の必要性を、実験および計算機シミュレーションにより示した。そして、この考え方に基づいたイオンプロセス装置に用いる熱陰極放電型単 1 グリッドイオン源の開発を行った。つぎにこの装置を、実際にトンネルバリア酸化物絶縁膜の形成や超伝導ジョセフソン素子の作製に応用し、試作したイオンプロセス装置がこれらの素子作製に有効であること、また低エネルギー化とエネルギーの制御が損傷の少ないイオンプロセス実現の観点から重要であることを示した。これらの実験および考察の結果の要点を各章ごとにまとめると次のようになる。

第 1 章と第 2 章では現在までの薄膜イオンプロセスの研究状況と、薄膜プロセスにおけるイオンの役割について述べた。

第 3 章ではスパッタリング法の低エネルギー化の効果を、絶縁物基板上に堆積した半導体薄膜の電気的特性のスパッタリング条件依存性から実験的に明らかにした。さらに、スパッタリング中に基板に入射する粒子のエネルギー分布を計算機シミュレーションにより求め、スパッタリング条件と結びつけた。これより、

1. 制御電極をもつバイアスパッタリング法により石英基板上に Ge 薄膜を堆積し、成膜条件と Hall 移動度とキャリア濃度、X 線回折および SEM による表面モフォロジーなどとの関係を調べた。その結果、ターゲット電圧が低くスパッタリングガス圧が高いほど Hall 移動度が大きく、一方キャリア濃度は小さくなり電気的特性が向上した。このような条件では、基板に入射する高速粒子の数

が減少し、これによる膜の損傷が減るため電気的特性が改善されるものと思われる。

2. 上の実験結果は、スパッタリングエネルギーが低下するような成膜条件では、基板に入射する高速粒子の数やエネルギーが減少するためであるとした。しかし、これを実際の装置で定量的に測定し、証明することは困難である。したがって、ここではこのような測定の代わりに、基板へ入射し堆積した半導体膜の電気的特性を劣化させる高速粒子としてスパッタ原子およびターゲット表面で中性化して散乱、反射する反跳 Ar ガス原子の2つを考え、これらの粒子の運動をモンテカルロ法により計算機シミュレーションした。そして、基板への入射エネルギー分布を求め、スパッタリング条件と関係づけることを試みた。これにより、ターゲット電圧やガス圧、さらに基板ターゲット間距離などのスパッタリングパラメータと基板入射粒子のエネルギー分布との関係の定量化が可能となり、低エネルギー化の効果を示すことができた。

3. 基板バイアスの効果は Nb 超伝導薄膜においてはバイアス電圧が $-80\text{V}$ 付近で結晶性と超伝導特性の改善が観測された。一方、Ge スパッタリング膜の場合は数 $10\text{V}$ の電圧から、バイアスの増加に伴って単調に Hall 移動度が低下し、キャリア濃度が増加した。このように、超伝導材料や半導体のスパッタリング膜では、 $100\text{eV}$ 以下のエネルギーの粒子の衝突でも電気的特性が影響を受けることがわかった。

第3章で検討した Ge スパッタリング膜の堆積条件の低エネルギー化の重要性、および Nb 超伝導膜のバイアス電圧の影響を考慮すると、イオンプロセスにおけるイオンの効果を系統的に調べるには、数 $100\text{eV}$ 以下の低エネルギー領域での研究が重要であると考えられる。さらにこのときイオンのエネルギーや密度の定量化と制御、イオン発生源と相互作用領域との完全分離などが必要である。第4章では、このような目的のためのイオン源の検討と開発を行った。次いで、薄膜イオンプロセスに用いるためにイオンビーム源の動作特性を測定した。その結果、

1. 試作検討した Ar および酸素イオン源は、加速電圧を変化させることにより $40\text{eV}\sim 400\text{eV}$ 程度までのイオンエネルギーを、イオンビーム電流密度最大 $1.15\text{mA}/\text{cm}^2$ 程度まで任意に制御することができ、このときのエネルギー分布の広がりには約 $10\text{eV}$ であった。また、ビームプロファイルの広がりも少なく、このイオン源はイオンアシスト蒸着、酸化膜の形成、イオンエッチング等の多岐にわたるイオンプロセスに応用できると考えられる。

第5章では、制御電極をもつバイアスパッタリング装置、低エネルギーイオンビーム源など、これまでの章でエネルギー制御の観点から検討したプロセス装置を用いて Nb 系超伝導ジョセフソン素子の作製とその素子特性の改善を行った。その結果

1. 制御電極をもつバイアスパッタリング装置を用いて Nb 系超伝導薄膜を絶縁物基板上に堆積した。このとき、Nb 膜ではバイアス電圧が $-80\text{V}$ で X 線回折の結果から結晶性の良い、ほぼバルクの値に近い $9.2\text{K}$ の臨界温度をもつ薄膜が得られた。一方 NbN の臨界温度は $16.5\text{K}$ であった。

2. 絶縁物基板上の超伝導膜を用いて Nb/NbOx/Pb, NbN/NbOx/Pb, Nb/AlOx/Nb の3種類のジョセフソン素子を作製した。そして、トンネルバリアを形成する直前に接合部を $100\text{eV}\sim 400\text{eV}$ のエネルギーの Ar イオンビームによりクリーニングした。この結果、例えば Nb/NbOx/Pb 素子では $200\text{eV}$ のイオンエネルギーを用いると従来の RF スパッタエッチングに比べて素子の

イオン損傷や温度上昇の少ないクリーニングが可能となり、素子の電流-電圧特性から求まるエネルギーギャップ電圧が理論値に近く、また接合界面の超伝導特性の劣化に起因する電流スパイクが特性上にほとんど見られない、これまでにない優れた特性をもつジョセフソン素子を作製することができた。このように、超伝導トンネル素子作製において、エネルギーを制御したイオンビームプロセスの有効性が示された。

付録として

1. 制御電極をもつスパッタリング装置の動作原理について簡単に解析し、制御電極によりターゲット電流が制御できること、またスパッタリング速度が向上することなどを示した。
2. Si 基板上の MIS 構造トンネルダイオードの作製に低エネルギー酸素イオン源を用い、酸素イオンビーム酸化法によりトンネルバリアとして薄い Si の酸化膜の形成を行った。その結果、酸素イオンの照射時間を変化させることにより酸化膜の厚さを制御でき、MIS ダイオード特性やトンネル抵抗の制御が可能であった。

以上のように、バイアスパッタリング法とイオンビーム法による低エネルギー薄膜イオンプロセスについて主に実験的検討を加えてきたが、特にイオンビーム源を用いた方法はイオンエネルギーやイオン電流密度の制御性が優れており、イオンと薄膜形成との相互作用を精密に制御することができるため、最適なプロセス条件の設定が可能である。しかもこの方法は低温度プロセスであることや、同じイオン源を用い種々のプロセスを同一チャンバー内でシーケンシャルに実行できることは大きな利点である。しかしながらより高度の結晶性の制御、エッチングや酸化膜厚の制御にはイオン源のさらなる単色化を、実用化の面からは大口径化が必要であり、また陰極からの汚染を無くしたイオン源の開発などが次の目標である。

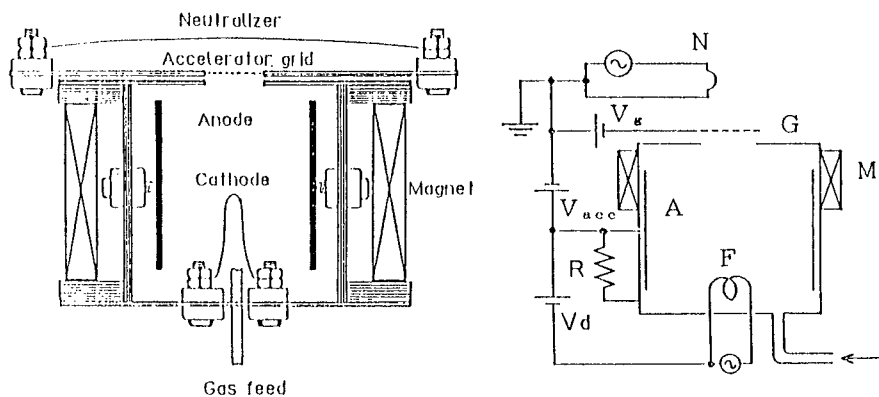
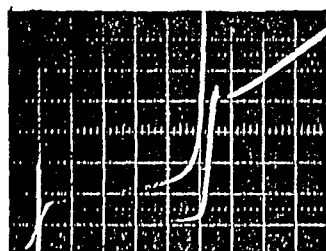
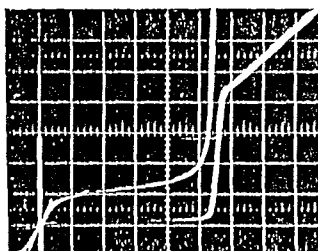


図1 試作した熱陰極放電型低エネルギーイオンビーム源の構造。  
イオンエネルギー40-400eV 可変、イオン電流密度は約  $1 \text{ mA/cm}^2$



(a) RF cleaning

hor. : 0.5mV/div.  
vert. : 5.0mA/div.  
and  $\times 10$



(b) I.B. cleaning

hor. : 0.5mV/div.  
vert. : 0.7mA/div.  
and  $\times 10$

図2 ジョセフソントンネル接合部を形成する際の表面クリーニングにRFスパッタを用いた場合と低エネルギーイオンビーム (I.B) を用いた場合との電流電圧特性の比較。I.Bはギャップ電圧が大きく、立ち上がり部分での電流スパイクがほとんど見られず良好な特性が得られている。

## 審査結果の要旨

半導体や超伝導デバイスの微細化と高性能化に伴い、高品質薄膜の形成のためのイオンプロセスがますます重要となっている。しかし、従来のイオンプロセスは、プラズマ中で生ずる各種粒子の数とエネルギーが形成薄膜の特性に複雑に関与するため、それぞれの寄与を分離した研究は十分にはなされて来なかった。

上記の観点から、著者は、イオンプロセスにおけるイオンエネルギーに着目し、その制御の重要性を理論と実験から明らかにすると共に、低エネルギー、低分散、高輝度特性を持つ単一グリッドイオン源を試作し、これをジョセフソントンネル接合素子の作製に適用し、その有効性を明らかにしてきた。

本論文は、これらの研究成果を纏めたもので、全文6章より成る。

第1章は序文である。

第2章では、薄膜イオンプロセスにおけるイオンの役割をそのイオンエネルギーとイオン密度に着目して考察し、イオンの効果を明確にするためには、この2つの量を独立に制御する必要のあることを指摘している。

第3章では、イオンエネルギーを制御するための制御電極を持つスパッタリング装置を試作し、薄膜形成時の高エネルギー粒子の基板入射の影響について系統的に行った実験結果を述べている。石英基板上に多結晶ゲルマニウム膜を堆積し、基板への入射粒子のエネルギーを低くおさえたスパッタリング条件では堆積膜の電気的特性が改善されることを明らかにしている。さらに、実験に用いたスパッタリング条件での入射粒子のエネルギー分布をモンテカルロ法により計算し、上記の実験結果を理論的に裏付けている。

第4章では、低エネルギー領域でイオンエネルギーとイオン密度を独立に制御できる単一グリッドイオン源を試作し、数100eV以下の領域でもイオンプロセスに必要なイオン密度とエネルギーの良い制御性の得られることを示した結果について述べている。これは、高品質薄膜の形成にイオンプロセスを実用する上で重要な成果であり評価できる。

第5章では、前章までに試作したイオンプロセス装置を、Nb系超伝導薄膜の絶縁物基板上への堆積およびジョセフソントンネル接合素子作製に適用し、ほぼバルクの値に近い臨界温度を持つ超伝導薄膜と従来のRFスパッタリング法に比べて高品質のジョセフソン素子の得られた結果について述べている。

第6章は結論である。

以上要するに本論文は、イオンプロセスにおけるイオンエネルギーの制御の重要性を明らかにして、イオン密度とイオンエネルギーを独立に制御できるイオン源を試作し、ジョセフソントンネル接合素子作製に適用し、その有効性を明らかにすると共に、半導体工学、超伝導工学に関する幾つかの知見を得た研究を纏めたもので、電子工学に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士(工学)の学位論文として合格と認める。