

学 位 論 文 題 名

超伝導トランジスタに関する研究

学位論文内容の要旨

今日の情報化社会の発展に伴い、さらに超高速で大容量の情報を扱うための電子デバイスが必要となってきた。従来の半導体デバイスは微細化によって、これまで高速、大容量のシステムサイドの要求を充たしてきた。しかしながらこのような微細化も限界が見え、半導体デバイスだけではこの限界を越えられない可能性が大きい。このため、さまざまなデバイスの提案がされてきた。中でも超伝導デバイスであるJosephson 素子は、半導体素子に比べて超高速かつ低電圧動作できる素子として期待されてきた。実際にゲート単体の性能では、半導体デバイス凌駕している。しかし二端子素子であることから現われる、入出力分離ができない、利得がなく動作マージンが小さい、などの本質的な問題点が、大きな回路を実現しようとする時間問題となってきた。このため Josephson 素子とは違った、素子単体で入出力分離機能、増幅作用があり、しかも超伝導のメリットを持つ三端子素子の出現が望まれ、様々なタイプの超伝導トランジスタ構造が提案されている。零抵抗などの超伝導性を電子デバイスに適用すれば、冷却が必要となったとしてもそのメリットは大きい。本論文では、超伝導体を用いたトランジスタの必要性を明らかにし、いくつかのタイプの超伝導トランジスタについて、実際にデバイスを試作、評価することによってプロセス・構造を検討したものである。

本論文は、以下の 7 章で構成されている。

第 1 章では、本研究の背景と目的、本論文の構成について述べる。

第 2 章では、Josephson 集積回路のプロセスマージンを評価するうえで重要な Josephson 接合の故障率の評価装置を開発し、接合の評価を試みており、プロセスマージンが直接デバイス動作マージンにつながるという Josephson 集積回路の問題点を述べている。その一つの解決方法として利得を持つ、入出力分離の可能な超伝導トランジスタの必要性を述べ、その中でも Josephson 素子に置き換わる高速、低消費電力素子として超伝導ベーストランジスタ、あるいは誘電体ベーストランジスタ構造の可能性を指摘している。

第 3 章では、超伝導ベーストランジスタのコレクタバリアとして、InGaAs/InAlGaAs/InGaAs 半導体ヘテロ接合を提案し、この構造を用いて三端子構造を作製した。コレクタ接合は MBE で作製し、60 meV の低いバリア高さを実現することができた。三端子素子の電流利得はエミッタ電流が 300 mA でコレクタ-ベース電圧が 20 mV のとき約 0.45 が得られた。この値

はこれまでのn-InSbやp-InSbをコレクタバリアとして用いた超伝導ベーストランジスタで得られている値に比べて1-3桁大きいことを示し、この構造の有効性を明らかにしている。

第4章では、酸化物超伝導体材料において、プラズマ酸化で部分的に結晶内に酸素を導入することで電気的特性を変え、電子デバイスを作製するというモノリシックな作製プロセスを提案している。超伝導の多結晶薄膜や単結晶表面を窒素、アルゴン雰囲気中の比較的低温アニールによって結晶構造を分解せずに還元し、半導体的な特性に変化できること、また低温プラズマ酸化によって酸素を供給し、超伝導状態に可逆的に復帰できることを確認した。さらにメタルマスクやレジストマスクを使ったプラズマ酸化により、半導体的な $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ (YBCO)薄膜中に超伝導体のパターンを形成できることを確認し、デバイスプロセス応用の可能性を得ている。

第5章では、酸化物超伝導体を用いたトランジスタを実現するために誘電体ベーストランジスタ構造を用いることを提案している。このトランジスタを実現するために、YBCOと SrTiO_3 チャネルの接合を評価した。Nbをドーピングしてn型半導体にした SrTiO_3 と金属、YBCOの接合を評価し、界面に何らかの低誘電率の薄い層が存在することを確認した。この構造を用いてエミッタ、コレクタ電極にYBCO超伝導薄膜を用いて誘電体ベーストランジスタを作製し、電界効果を用いた高温超伝導電極トランジスタとしては世界で初めて1以上の電流電圧利得を得ている。

さらに誘電体ベーストランジスタの性能向上には低誘電率で電子透過率の高い中間層がエミッタ/ベース、コレクタ/ベース接合に必要であることから、YBCO/oxide/ SrTiO_3 ダイオード構造を使ってartificialな中間層の材料を検討した。実際に NdGaO_3 と MgO の中間層を使ってトランジスタを試作し、エミッタ電流密度に格段の改善が見られ、artificial中間層の有効性を確認し、酸化物超伝導薄膜を用いたトランジスタの可能性を示している。

第6章では、誘電体ベーストランジスタ構造の性能向上を目指して、エミッタ-コレクタ電極間距離を短くしたトランジスタについて検討した。高ドーピングした SrTiO_3 上に約50 nmに接近させたNb薄膜電極を作製して超伝導弱結合を実現し、この弱結合がJosephson素子として動作していることより、初めて SrTiO_3 酸化物内に近接効果により超伝導電流を誘起できることを示した。さらに絶縁性 SrTiO_3 の表面に薄い高ドーピングチャネル層を作製する技術を開発した。この方法を用いて三端子構造を作製し、ゲート電極の電界によりチャネルのキャリア量をコントロールして、チャネル抵抗を変化させることができた。以上のことから酸化物チャネルを用いた電界効果型トランジスタの超伝導電流制御の可能性を実証している。

第7章は、本論文の結論であり、得られた成果をまとめている。

学位論文審査の要旨

主 査	教 授	栗 城 真 也
副 査	教 授	武 笠 幸 一
副 査	教 授	大 西 利 只
副 査	教 授	陽 完 治

学 位 論 文 題 名

超伝導トランジスタに関する研究

今日の情報化社会の発展に伴い、さらに超高速で大容量の情報を扱うための電子デバイスが必要となってきた。従来の半導体デバイスは微細化によって、これまで高速、大容量のこのようなシステムサイドの要求を充たしてきた。しかしながら微細化による発展も限界が見え、半導体デバイスだけではこの限界を越えられない可能性が大きい。このため、超伝導デバイスである Josephson 素子は、半導体素子に比べて超高速かつ低消費電力で動作する素子として期待されてきた。しかし入出力分離ができない、利得がなく動作マージンが小さい、などの二端子素子であることによる本質的な問題点が存在する。このため、素子単体で入出力分離機能、増幅作用があり、しかも超伝導のメリットを持つ三端子素子の出現が望まれ、具体的な超伝導トランジスタ構造が提案されてきた。

本論文では、このような背景のもとで、超伝導体を用いたトランジスタの必要性を明らかにし、超伝導トランジスタについて、実際にデバイスを試作、測定、評価することによって作製プロセスや素子構造について検討を行ったものである。本論文は、7章から構成されている。以下に各章の概要を示す。

第1章では、本研究の背景と目的、本論文の構成について述べている。

第2章では、Josephson 集積回路のプロセスマージンを評価するうえで重要な接合の故障率の評価を試み、プロセスマージンが直接デバイス動作マージンにつながるという Josephson 集積回路の問題点を述べている。その一つの解決方法として利得を持つ、入出力分離の可能な超伝導トランジスタの必要性を述べ、Josephson 素子に置き換わる高速、低消費電力素子として超伝導ベーストランジスタ及び誘電体ベーストランジスタの可能性を指摘している。

第3章では、超伝導ベーストランジスタのコレクタバリアとして、InGaAs/InAlGaAs/ InGaAs 半導体ヘテロ接合を提案し、この構造を用いて三端子構造を作製した。コレクタ接合は分子線エピタキシャル法で作製し、60meV の低いバリ

ア高さを実現することができた。さらに電流伝達率はこれまでの超伝導ベーストランジスタで得られている値に比べて 1~3 桁大きいことを示し、この構造の有効性を明らかにしている。

第4章では、酸化物超伝導体材料において、プラズマ酸化で部分的に結晶内に酸素を導入することで電気的特性を変え、電子デバイスを作製するというモノリシックな作製プロセスを提案している。超伝導薄膜や単結晶表面を還元雰囲気中の低温熱処理によって、半導体的な特性にできること、またその後低温プラズマ酸化によって、超伝導状態に可逆的に復帰できることを実験的に確認し、さらにマスクを使ったプラズマ酸化により、半導体的な $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ (YBCO) 薄膜中に超伝導体のパターンを形成できることを確認して、デバイスプロセス応用の可能性を示している。

第5章では、酸化物超伝導体を用いたトランジスタを実現するために誘電体ベーストランジスタという新たな構造を用いることを提案している。ベースに SrTiO_3 高誘電体、エミッタ、コレクタ電極に YBCO 超伝導体薄膜を用いた誘電体ベーストランジスタを作製し、高温超伝導体電極を用いた電界効果型トランジスタとしては世界で初めて 1 以上の電流電圧利得を得ている。さらにエミッタ/ベース、コレクタ/ベース間に低誘電率で電子透過率の高い NdGaO_3 や MgO の中間層をはさむことで、エミッタ電流密度に格段の改善が見られ、酸化物超伝導体薄膜を用いたトランジスタの可能性を示している。

第6章では、誘電体ベーストランジスタ構造の性能向上を目指して、エミッタ-コレクタ電極間距離を短くした電界効果型トランジスタについて検討した。高ドープした SrTiO_3 で結合した Nb 薄膜超伝導弱結合を実現し、この弱結合が Josephson 素子として動作することより、初めて SrTiO_3 酸化物内に近接効果により超伝導電流を誘起できることを示した。さらに絶縁性 SrTiO_3 の表面に薄い高ドープチャネル層を形成する技術を開発し、三端子構造を作製して、ゲート電極の電界によりチャネルのキャリア量をコントロールして、チャネル抵抗を可変できた。これらから、酸化物チャネルを用いた電界効果型トランジスタの超伝導電流制御の可能性を実証している。

第7章は、本論文の結論であり、得られた成果をまとめている。

これを要するに、著者は、超伝導体を用いたトランジスタの実現のための構造、作製方法に関して、多くの有用な新知見を得ており、電子工学の進歩に寄与するところ大である。

よって、著者は、北海道大学博士(工学)の学位を授与される資格あるものと認める。