

学位論文題名

Bi系高温酸化物超伝導体薄膜とその積層型素子に関する研究

学位論文内容の要旨

高温酸化物超伝導体は、金属系超伝導体に比べ高い超伝導遷移温度を持ち、簡易に得られる低温環境下で超伝導性を示す。この材料を用いることにより、従来金属系超伝導体を用いていた超伝導素子の応用システムを小型化することができ、また超伝導素子の特性向上も期待される。このように高温酸化物超伝導体の素子化は実用的に大きな意味を持つ研究課題である。超伝導素子を構成する際、特性の安定性および制御性の観点より積層型の素子構造とすることが望ましく、高温酸化物超伝導体の素子応用においても同様に積層型素子の開発が重要となる。

高温酸化物超伝導体は、ペロブスカイト構造を基本とした層状構造を持ち、他の類似の層状構造化合物、あるいはペロブスカイト構造の物質との格子整合性がよい。その中でも Bi 系酸化物超伝導体は、2次元性の強い材料であり、Bi 層状構造化合物と積層することで優れた積層型素子を構成できる可能性がある。本研究は Bi 系酸化物超伝導体薄膜と、他の酸化物薄膜との積層化、およびその積層膜の超伝導素子への応用を検討したものである。

本研究では、まず高温酸化物超伝導材料の薄膜作製方法について検討し、積層型素子作製に有効な薄膜堆積方法について考察を加えた。次に Bi 系酸化物薄膜の結晶構造特性のうち、結晶性、変調構造、基板材料とのエピタキシャル関係を明らかにした。また、Bi 系酸化物超伝導体 (BSCCO) と、それと類似の結晶構造を有する Bi 系酸化物 (BSCO、BSNCO)、および Pb 系強誘電体が近い格子定数を持つことに着目し、これらの組合せにおいて、良好な積層薄膜が作製できることを示した。次に、BSCCO を超伝導電極に用い、BSCO をバリア層として用いた BSCCO/BSCO/BSCCO 接合、および BSNCO をバリア層とした BSCCO/BSNCO/BSCCO 接合を提案し素子特性を検討した。これらの素子において、良好な Josephson 効果および非線形特性が観測されることを示し、また、素子における Josephson 効果は、バリア層である BSCO、BSNCO を介した SNS 型構造における近接効果によることを明らかにした。最後に、この積層型素子において、マイクロ波帯でのヘテロダイン検波動作を実証し、高周波能動素子としての応用可能性を実証した。これら実験的研究を通じ、高温酸化物超伝導体の積層型素子において、超伝導材料と類似の結晶構造を有する酸化物材料の組み合わせが有効であり、この積層構造による高温超伝導素子の工学的応用の可能性を示した。

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 小 柴 正 則
副 査 教 授 山 谷 和 彦

学位論文題名

Bi系高温酸化物超伝導体薄膜とその積層型素子に関する研究

近年、移動体通信の発展に伴い、通信システムにおける機器の効率化、大容量通信システムの開発が重要な研究課題となっている。通信機器の効率化においては、特に基地局側で用いられる通信機器の高感度化、低損失化が有効である。また、大容量通信の実現に向けては、通信搬送波の高周波化、すなわち通信機器の高周波化が望まれる。超伝導体を用いた能動素子は、その高感度特性、低損失性、さらに超高周波で動作可能なことにより、これら要求を満たす可能性があり、高周波素子としての応用が期待されている。

本論文は、このような背景のもと、移動体通信における基地局の高感度化、超高周波化の要求に応える能動素子として、高温酸化物超伝導体を用いた超伝導素子の可能性を探索している。このために、素子特性の安定性や、実用上必要となる他の受動素子、半導体素子との集積化を考慮し、積層型超伝導素子の実現を目的としたもので、主な成果は以下の点に要約される。

(1) 高温酸化物超伝導体として、超伝導臨界温度が高く、また結晶構造が、積層構造に有利な層状をなす Bi 系酸化物超伝導体 ($\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$) に着眼し、この材料の酸化性雰囲気を用いたスパッタ法による薄膜化技術を確立した。特に素子応用に重要となる良好な超伝導特性、および平坦な表面を持つ薄膜を得ることを目指し、この材料系としては比較的低温である 650°C の成膜温度による薄膜形成方法を確立した。また、Bi 系酸化物超伝導体と同種の材料でありながら、超伝導性を示さない Bi 系酸化物材料 ($\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CuO}_{6+\delta}$ 、 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{NdCu}_2\text{O}_{8+\delta}$) についても、Bi 系酸化物超伝導体と同一成膜条件における薄膜形成方法を確立した。

(2) 上記の薄膜化技術を応用し、Bi 系酸化物材料を同一真空中において連続成膜する積層化技術を確立した。この技術により作製した積層膜の各層は、その結晶性、積層界面における組成分布において良好な特性を示した。さらに、積層膜に対する微細加工、電極形成等のデバイス化の検討を行い三層構造の二端子素子を作製し、それらの素子において中間の非超伝導層を通過して流れる超伝導臨界電流を観測した。さらに、電流-電圧特性において強い非線形特性（負性抵抗特性）が存在することを見いだした。

(3) 超伝導臨界電流の温度依存性と高周波応答の解析を行い、積層型素子が、超伝導／常伝導／超伝導型 (SNS 型) ジョセフソン接合として振る舞うことを明らかにし、さらに素子の等価回路として抵抗シャント型接合モデル (RSJ モデル) が適用できることを示した。これにより本研究の積層型素子を高周波素子として応用する際、低温超伝導体の SNS 型接合および RSJ モデルによる解析手法が利用できるという有用な知見を得た。ここで、Bi 系酸化物超伝導体を用いた積層型素子の実現とジョセフソン効果の実証は、他に先駆けて実現されたものである。

(4) 積層型 SNS 素子を高周波ミキサとして動作させ、20GHz 帯でヘテロダインミキシングの基本特性を得ることに成功し、ミキシング特性がジョセフソン効果および負性抵抗特性に起因する 2 種類の非線形効果によることを確認した。また、積層型素子と現在ミキサとして広く用いられている半導体ダイオードとの比較において、実験室レベルで高周波信号の検出感度が約 10^4 倍優れていること、 10^{-2} から 10^{-4} の大きさの局部発振電力で動作可能であることを実証した。

以上を要するに、著者は、高温酸化物超伝導体の薄膜化と積層化技術を確立、積層型超伝導素子を実現、さらにその高周波ミキサ素子としての有用性を示しており、超伝導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者と認める。