

【助成 41-19】

NMR 用超伝導 RF コイルに向けた高特性超伝導薄膜の創製

山梨大学 大学院総合研究部工学域 電気電子情報工学系(電気電子工学) 助教 作間 啓太

〔研究の概要〕

強磁場(9~30 T)を用いる核磁気共鳴(NMR)装置は、医療・材料分野など広範な分野において必要不可欠な分析装置である。しかし、測定感度(S/N 比)が絶対的に低く、感度向上は至上命令とされている。そこで超伝導体を用いた高感度 NMR 用 RF コイルの実用化が期待されている。しかし、超伝導材料面(超伝導体は磁場中では特性が低下する)およびコイル構造面(マイスナー効果により静磁場が乱される)の問題が存在し、RF コイルの感度が低下する。本研究では、材料面の問題である磁場中で特性が低下する問題を解決するため、キャリア密度の制御および磁束ピン止め点制御技術による超伝導薄膜の磁場中特性向上を試みた。キャリア密度制御および磁束ピン止め点制御により磁場中特性が向上することが明らかになり、高感度 NMR 用 RF コイルへの応用が期待される。

〔研究経過および成果〕

強磁場(9~30 T)を用いる核磁気共鳴(NMR)装置は、測定感度(S/N 比)が分析装置の中でも絶対的に低く、感度向上は至上命令とされている。感度を向上させる最も有力かつ安価な方法は超伝導体を用いた RF コイル[RF 信号(磁場)照射と NMR 信号検出を行う]の高感度化である。しかし、超伝導 RF コイルには、材料およびコイル構造についての問題が存在し、特に材料面の問題である磁場中超伝導特性の低下が重大な問題として顕在化している。超伝導体に、臨界磁場(超伝導体に磁束が侵入し始める磁場)以上の磁場を印加すると磁束が超伝導内に侵入し、侵入した磁束が抵抗となり「表面抵抗 R_s の増加」「臨界電流密度 J_c の低下」が生じる。また、そこに電流を流すと、ローレンツ力により超伝導体に侵入した磁束が運動し、この運動も抵抗となり、「 R_s の増加」「 J_c の低下」が生じる。これら材料面の問題を解決する手法として、超伝導内への磁束侵入を抑制するため臨界磁場の向上

をもたらすキャリア制御および磁束運動を抑制するため磁束ピン止め点の制御が必要である。加えて、RF コイルには、最低でも 25mm 角の超伝導薄膜が必要とされる。

本研究では、25mm 角の超伝導 $\text{REBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ (RE: Rare-earth)[REBCO]薄膜を作製し、その後、キャリア制御および磁束運動を抑制するため磁束ピン止め点の制御を用いて NMR 用超伝導 RF コイルに向けた高特性超伝導薄膜の創製を試みた。

REBCO 薄膜の作製には、直流において高特性薄膜が得られている Trifluoroacetate metal-organic deposition (TFA-MOD)法を用いた[K. Sakuma et.al., Japanese Journal of Applied Physics 58, 053001 (2019)]。

図 1 に作製した REBCO 薄膜の概観を示す。基板全面が黒色をしており、XRD 測定からも REBCO 薄膜が成長していることが確認された。このことから、NMR 用 RF コイルに必要な 25mm 角 REBCO 薄膜が作製可能であることがわかった。

キャリア制御のため、様々なアニール温度で REBCO 薄膜の酸素アニール処理を行った。図 2 に超伝導転移温度(T_c)のアニール温度依存性を示す。アニール温度が 400℃以下では T_c が低下していることから、400℃以下は Over-dope 領域であり、特性の向上が期待される。図 3 に不可逆磁場の温度依存性を示す。キャリアの増加に伴い不可逆磁場が向上しており、 J_c の向上が示唆される。次に、このキャリア制御した Over-dope REBCO 薄膜に磁束ピン止め点制御により磁束ピン止め点を導入した。直流四端子法により J_c の測定を行い、磁場中 J_c 値が市販されている REBCO 薄膜の 10 倍に達することがわかった。

誘電体共振器法を用いてキャリア制御および磁束ピン止め点制御した REBCO 薄膜の磁場中 R_s の測定を行った。作製した REBCO 薄膜の磁場中 R_s は 5.0 mΩ@5 T, 22 GHz, 15 K であり、この値は市販 REBCO 薄膜の 1/4 に達する低い値である。

以上のように、非常に高特性の超伝導 REBCO 薄膜が得られ、NMR 用 RF コイルへの応用が期待される。今後は、実際に RF コイルを作製し、高感度化を実証する。

[発表論文]

1. K. Sakuma, R. Yamashita, K. Ito, J. Murakami, A. Saito, and N. Sekiya, “Enhancement of the in-field critical current density and surface resistance of trifluoroacetate metal organic deposition derived large-size REBa₂Cu₃O_y thin film by doping BaMO₃ nano particles.” Applied Superconductivity Conference 2024, 3MPo2B-04
2. R. Yamashita, K. Takeda, N. Sekiya, K. Sakuma, “Preparation of Trifluoroacetate Metal Organic Deposition derived double-sided REBa₂Cu₃O_y thin

film with high-superconducting properties for high-frequency devices.” Applied Superconductivity Conference 2024, 3MPo1C-08

3. K. Sakuma, R. Yamashita, K. Ito, J. Murakami, A. Saito, and N. Sekiya, “Enhancement of the in-field critical current density and surface resistance of trifluoroacetate metal organic deposition derived large-size REBa₂Cu₃O_y thin film by doping BaMO₃ nano particles.” IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY 投稿中

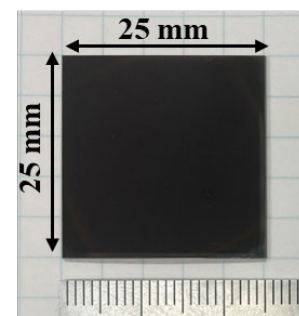


図 1 REBCO 薄膜の概観

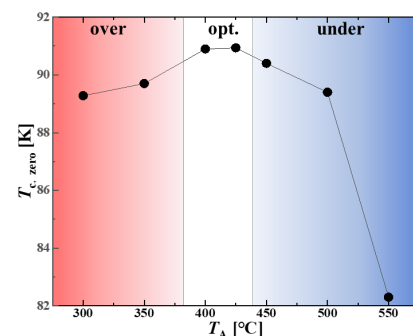


図 2 T_c のアニール温度依存性

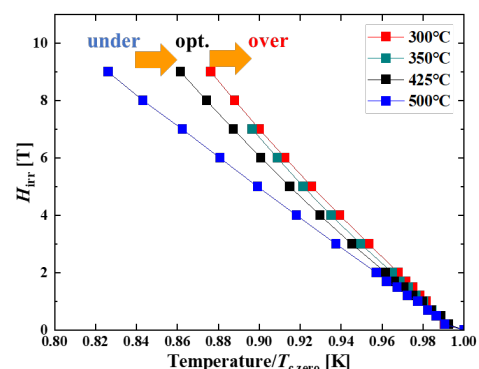


図 3 不可逆磁場の温度依存性