

# スパッタリング法による磁性薄膜の作製とその応用

渡邊 騎通\* 中山 明芳\*\*

## Fabrication and Application of Magnetic Thin Films Prepared by Sputtering

Norimichi WATANABE\*

Akiyoshi NAKAYAMA\*\*

### 1. 緒言

超伝導体をエレクトロニクスに応用する際には、ジョセフソン接合と呼ばれている超伝導デバイスを作製することが基本になる。ジョセフソン接合は、二つの超伝導体で薄い絶縁層を挟んだ構造をしているが、我々は、超伝導体に Nb、絶縁層に酸化アルミニウムを用いた Nb/Al-AIO<sub>x</sub>/Nb ジョセフソン接合を作製し、その磁界特性について調べてきた[1, 2]。試料作製には、Nb と Al を成膜するスパッタリング室と Al 表面を酸化させるための酸化室を有するロードロック方式の dc マグネトロンスパッタリング装置を用いて、Nb/Al-AIO<sub>x</sub>/Nb の積層膜を成膜することによりジョセフソン接合の作製を行ってきた。このトンネル接合型の超伝導体/絶縁体/超伝導体ジョセフソン接合は、Nb/Al-AIO<sub>x</sub>/Nb の材料の組み合わせで作製したものが、素子作製の歩留まりもよく、超伝導特性の再現性もよいことから最も多く作製されている[3]。しかしながら、近年、トンネルバリア層に酸化アルミニウムに変えて、希釈磁性である銅ニッケル (CuNi) やパラジウムニッケル合金 (PdNi) を用いた磁性ジョセフソン接合の研究が精力的に行われている。磁性ジョセフソン接合では、超伝導体間における超伝導巨視的波動関数の位相差を直接制御できるようになるため、新たなメモリ素子の開発や超伝導量子ビットへの応用が研究されている [4-6]。当研究室でも、Nb/Al-AIO<sub>x</sub>/Nb ジョセフソン接合の電気的磁気的特性の研究に加え、磁性ジョセフソン接合の研究を始めるため、磁性薄膜を作製するための新たなスパッタリング装置を製作することを考え、工学部重要機器整備費で RF スパッタ装置プラットフォームを購入した。磁性薄膜の作製が可能になると、磁性ジョセフソン接合の研究に加え、磁性薄膜を用いた磁気デバイスの研究を始めることも可能になる。

### 2. 実験装置

図 1 に、RF スパッタ装置プラットフォームを示す。スパッタ室とロードロック (LL) 室を有し、スパッタ室および LL 室への基板搬送が可能な手動トランスファーロードが取り付けられている。スパ

ッタ室のマグネトロンスパッタソースは、取り付けフランジが ICF-152、ターゲット固定はリテーナー式、マグネット材質が SmCo のスパッタソースを採用している。また、スパッタ室を新たに増設することが可能な仕様になっている。ドライポンプとターボ分子ポンプで真空排気を行い、到達真空度は  $1.0 \times 10^{-5}$  Pa 程度である。

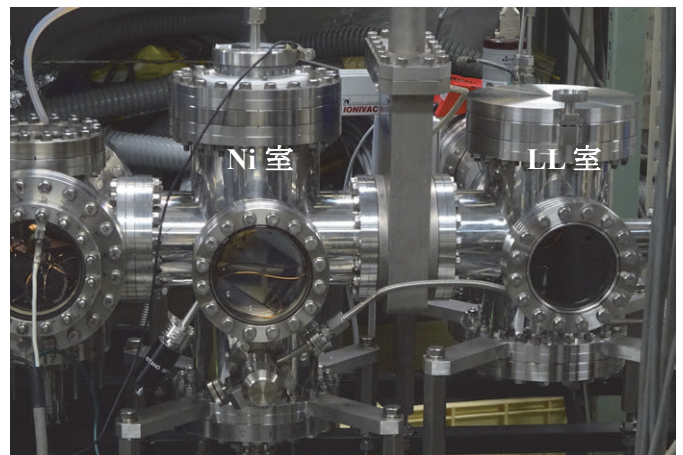


図 1 RF スパッタ装置プラットフォーム

### 3. 実験

スパッタソースに、Ni ターゲットを取り付け、各スパッタガス圧におけるスパッタリングレートを探った。スパッタリングガス圧 1 Pa、3 Pa、5 Pa の各ガス圧において、時間を変えて 3 回成膜し、その膜厚を触針式表面荒さ計で測定した。結果を図 2 に示す。Ni の場合は、スパッタリング時のアルゴンガス圧を大きくしていくと、スパッタリングレートが小さくなっていくことがわかった。次に、スパッタリング時のアルゴンガス圧を、2 Pa にして成膜したものと、5 Pa にして成膜したものの 2 種類の Ni 薄膜を作製し、薄膜の表面を走査型電子顕微鏡 (SEM) で観察して比較した。Ni 薄膜の膜厚は 300 nm に統一した。アルゴンガス圧 2 Pa で成膜した Ni 薄膜の表面を、SEM で観察した結果を図 3(a)に示す。SEM 像では、試料表面の凹凸が明暗のコントラストで表されるが、2 Pa で成膜した試料では、明瞭な表面形態が観測されていないことから、薄膜の結晶粒は小さく、試料表面は平坦であると考えられる。図 3(b)に、アルゴンガス圧 5 Pa で成膜した Ni 薄膜の表面を SEM で観察した

\*特別助教 電気電子情報工学科

Assistant Professor, Dept. of Electrical, Electronics, and Information Engineering

\*\*教授 電気電子情報工学科

Professor, Dept. of Electrical, Electronics, and Information Engineering

結果を示す。図 3(a)と比較して、薄膜の結晶粒が明瞭に観測されている。以上より、Ni 磁性薄膜をスパッタリングで成膜した場合、アルゴンガス圧が大きくなると、薄膜の結晶粒が大きくなり、表面粗さが大きくなることがわかった。スパッタリングによって作製される薄膜には、スパッタガス圧の値によって引張り性応力や圧縮性応力が生じる[7]。ジョセフソン接合の作製においては、電極となる Nb の成膜時にストレスフリーとなるスパッタガス圧で Nb を成

膜すると、優れた超伝導特性を持つジョセフソン接合が作製できることが知られている[8]。また、磁性ジョセフソン接合のバリア層に用いる磁性薄膜も、スパッタガス圧を変えて成膜することにより磁化特性が変化し、磁性ジョセフソン接合の超伝導特性に影響を与えることが予想される。さらに、磁気デバイスの研究においては、スパッタガス圧を変えて成膜した 50 パーマロイの積層膜において、各層の内部応力の違いを利用して、回転検出センサを作製する研究が行われている[9]。当研究室においても、スパッタガス圧と磁性薄膜の内部応力の関係を調べていく予定である。

#### 4. 結言

RF スパッタ装置プラットフォームに、ターボ分子ポンプやスパッタソースを取り付け、Ni 薄膜の成膜を行った。成膜時のアルゴンガス圧が 1 Pa、3 Pa、5 Pa の各ガス圧において、Ni 薄膜のスパッタリングレート求めた。さらに、アルゴンガス圧 2 Pa、5 Pa で成膜した Ni 薄膜の表面形状を SEM により観察し、スパッタ時のアルゴンガス圧が大きくなると、薄膜の結晶粒と表面粗さが大きくなることわかった。今後、RF スパッタ装置プラットフォームを利用して、磁性薄膜や磁性ジョセフソン接合の研究を進めていく。

#### 参考文献

- [1] A. Nakayama, S. Abe, N. Watanabe, Two-dimensional magnetic field dependence of Josephson current and resonant current steps at finite voltage of square shape superconducting tunnel junctions, *J. Appl. Phys.*, 111, 113907 (2012).
- [2] N. Watanabe, S. Abe, and A. Nakayama, Modulation of a Josephson current through an Nb/Al-AlO<sub>x</sub>/Nb Josephson junction by a parallel magnetic field and perpendicular magnetic field, *J. Appl. Phys.*, 116, 033920 (2014).
- [3] Y. Tarutani, M. Hirano, U. Kawabe, Niobium-Based Integrated Circuit Technologies, *Proc. IEEE*, 77, 1164-1176 (1989).
- [4] T. I. Larkin, V. V. Bol'ginov, V. S. Stolyarov, V. V. Ryazanov, Igor V. Vernik, S. K. Tolpygo, O. A. Mukhanov, Ferromagnetic Josephson switching device with high characteristic voltage, *Appl. Phys. Lett.* 100, 222601 (2012).
- [5] T. Yamashita, H. Terai, Recent Progress in Ferromagnet/Superconductor Hybrid Structure and its Applications to Cryogenic Computing, *IEEJ Trans. Fundam. Mater.*, 136, 728-733 (2016).
- [6] T. Yamashita, A. Kawakami, H. Terai, NbN-Based Ferromagnetic 0 and  $\pi$  Josephson Junctions, *Phys. Rev. Appl.*, 8, 054028 (2017).
- [7] 金原繁, 吉田貞史, 近藤高志, 薄膜工学 第 3 版, 丸善出版 (2016).
- [8] T. Imamura, S. Hasuo, EFFECTS OF INTRINSIC STRESS ON SUBMICROMETER Nb/AlO<sub>x</sub>/Nb JOSEPHSON JUNCTIONS, *IEEE Trans. Magn.*, 25, 1119-1122 (1989).
- [9] 馬場康壽, 星川潔, 秋山賢輔, 栗原幸男, 根岸靖, 小山昌二, 安部正規, 後藤章博, 渡邊騎通, 阿部晋, 大バルクハウゼン効果を用いた薄膜磁気センサの作製, *日本応用磁気学会誌*, 27, 406-409 (2003).

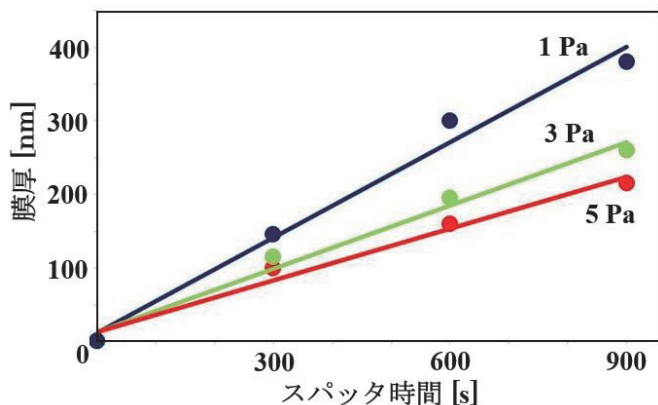


図 2 各スパッタガス圧におけるスパッタ時間と Ni 薄膜の膜厚の関係

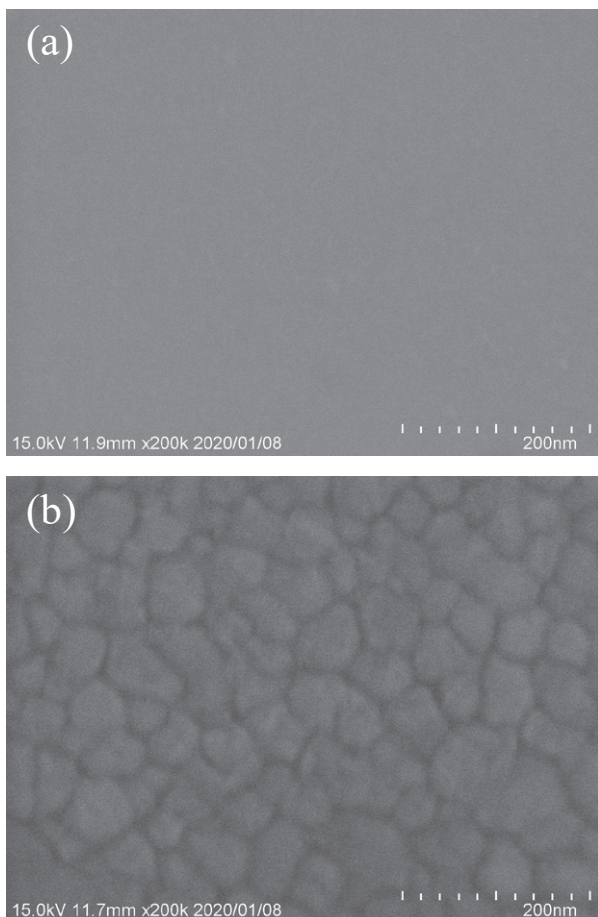


図 3 SEM で観察した Ni 薄膜の表面

- (a) スパッタガス圧 2Pa で成膜
- (b) スパッタガス圧 5Pa で成膜