

2023年 1月 6日

応用化学・生命工学専攻	学籍番号	第 153434 号	指導教員	田中 三郎
氏名	林 幹二			高島 和則

## 論文内容の要旨 (博士)

博士学位論文名	高温超伝導SQUIDのナノジョセフソン接合およびアンチドットによる磁束ノイズ低減に関する研究
---------	--

(要旨 1,200 字程度)

高温超伝導体磁束量子干渉計 (HTS-SQUID : High Temperature Superconductor - Superconducting Quantum Interference Device) は、液体窒素の沸点77.4 K付近に冷却することで、ホワイトノイズが低い (10 fT/Hz<sup>1/2</sup>程度) 超高感度な磁気センサとして動作する。4.2 K付近で動作する低温超伝導体SQUID (約0.1 fT/Hz<sup>1/2</sup>) と比較してノイズ特性は劣るが、液体窒素温度で運用できることから、HTS-SQUID応用設備ではコスト低減、規模の縮小が可能である。しかし、HTS-SQUIDで多く用いられているバイクリスタル型ジョセフソン接合は、高価なバイクリスタル基板が必要で、再現性や設計自由度にも課題がある。また、高温超伝導体は、超伝導状態と磁束が共存する特性から超伝導薄膜内部に磁束が侵入しやすく、磁束ノイズが増加する傾向がある。そこで、本研究では、HTS-SQUIDのノイズ低減を目的として、磁束をトラップしないナノジョセフソン接合と、磁束を固定する機能を有するアンチドットに着目した。ナノ接合は、イオン照射によって超伝導体薄膜を狭めることでジョセフソン接合を作製するため、特殊な基板を必要としない。また、ナノ接合は、超伝導体の磁場侵入長に比べて小さいため、ジョセフソン接合付近にノイズの原因となる磁束が捕捉されることがなく、磁束によるノイズを低減できる可能性がある。さらに、薄膜中に侵入した磁束に対しては、超伝導体薄膜に形成された微細な非超伝導状態の穴であるアンチドットによって固定できると考えられる。このようなナノ接合やアンチドットの作製には、HTS薄膜をナノ精度で加工する技術が必要となる。そこで、イオンビーム照射によるHTS薄膜のパターニングに着目した。イオンビームを照射されたHTS薄膜は、結晶構造が破壊されることで、局所的に非超伝導化する。本研究では、集束イオンビーム (FIB : Focused Ion Beam) を走査し、ナノ精度の微細加工を行った。本論文は、全7章で構成され、第1章では、研究の背景としてSQUID磁気センサの磁束ノイズ低減に関する研究の概況と、本研究で検討を行ったナノ接合とアンチドットによる磁束ノイズ低減法の意義について説明している。第2章では、超伝導体とジョセフソン接合、およびSQUIDの基礎的な原理を説明している。第3章では、FIB加工に適する高い膜質と平滑な膜面を両立可能なHTS薄膜のレーザー蒸着による成膜条件を検討している。続いて、第4章では、シミュレーションと実験により、様々な膜厚や膜質のHTS薄膜のFIBによる加工特性を評価している。そして、第5章でFIB照射によるHTS薄膜の常伝導化を利用した2種類のナノ接合の作製を行うとともに、ナノ接合型SQUIDの作製・評価を行っている。また、ナノ接合の特性の考察から、低加速電圧のFIB照射による特性の改善法を考案し、実際に改良型ナノ接合の作製と評価を行っている。さらに、第6章では、SQUIDの磁束ノイズ低減を目的として、バイクリスタル型SQUIDへFIBでアンチドットを導入し、ノイズ特性への影響を調査している。最後に第7章では本論文の総括を行っている。

Date of Submission (month day, year) : January 6<sup>th</sup>, 2023

Department of Applied Chemistry and Life Science	Student ID Number D153434	Supervisors Saburo Tanaka Kazunori Takashima
Applicant's name Kanji Hayashi		

## Abstract (Doctor)

Title of Thesis	Study on Flux Noise Reduction of HTS-SQUID using Nano-Josephson Junctions and Antidots Introduction
-----------------	---

Approx. 800 words

High temperature superconductor - superconducting quantum interference device (HTS-SQUID) is an ultra-sensitive magnetic sensor with low white noise ( $\sim 10$  fT/Hz<sup>1/2</sup>) and operates near a liquid nitrogen temperature of 77 K. HTS-SQUIDs have inferior noise properties compared to low-temperature superconductor SQUIDs ( $\sim 0.1$  fT/Hz<sup>1/2</sup>), which operates near liquid helium temperature of 4.2 K, but they can be operated at higher temperature, which reduces the cost and the size of the SQUID application facilities. However, bicrystal Josephson junctions, which are often used in HTS-SQUIDs, have many problems, including the price of bicrystal substrates, reproducibility, and design flexibility. Because of the coexistence of the superconducting state and magnetic flux in high-T<sub>c</sub> superconductors, the noise due to magnetic flux motion in HTS-SQUIDs increases. Therefore, this study was focused on nano-Josephson junctions, which do not trap magnetic flux, and antidots, which fix magnetic flux for the noise reduction in HTS-SQUIDs. Nano-junctions are fabricated by ion irradiation to narrow the superconductor thin film, eliminating the need for a bicrystal substrate. Nano-junctions have the potential to reduce flux noise because they are smaller than the magnetic field penetration length of superconductors and expel the magnetic flux. On the other hand, antidots, which are microscopic non-superconducting holes formed in a superconductor thin film, could reduce noise by fixing the magnetic flux in the film. The fabrication of nano-junctions and antidots requires technology to process HTS thin films with nano-level precision. Therefore, the patterning methods by a focused ion beam (FIB) was used. When HTS thin films are irradiated with ion beams, their crystal structure is damage and they become locally non-superconducting. HTS thin films were partially transformed to a non-superconducting state using FIB, and nano-junctions and antidots were successfully fabricated with nano-level precision. This paper consists of seven chapters. In Chapter 1, as background to the study, an overview of current research of flux noise reduction in SQUID magnetic sensors and the flux noise reduction method using nano-junctions and antidots are described. In Chapter 2, the basic principles of superconductors, Josephson junctions, and SQUIDs are explained. In Chapter 3, the pulsed laser deposition conditions that produce high current density and smooth HTS film surfaces were discussed. In Chapter 4, the FIB processing conditions of various HTS thin films were investigated by simulation and experiment. In Chapter 5, two types of nano-junctions and SQUIDs were fabricated by FIB irradiation, and the correlation between the properties of the nano-junctions and the cross-sectional structures was discussed. In addition, an improved method for nanojunctions using low acceleration voltage FIB was proposed and characterized. In addition, an improved method of nanojunctions by FIB irradiation with low acceleration voltage was proposed, fabricated and evaluated. Chapter 7 summarizes this thesis.