

2세대 초전도 선 안정화 층 구조변화가 비저항 특성에 미치는 영향

반상재¹, 두호익¹, 정현기¹, 두승규², 양성채¹ 

¹ 전북대학교 전기공학과

² 한국원자력연구원

Effect of Structure Change in Second-Generation Superconducting Wire Stabilization Layer on Resistivity Characteristics

Sang-Jae Ban¹, Ho-Ik Du¹, Hyun-Gi Jeong¹, Seung-Gyu Doo², and Sung-Chae Yang¹

¹ Department of Electricity Engineering, Jeonbuk National University, Jeonju 54896, Korea

² Korea Atomic Energy Research Institute, Daejeon 34057, Korea

(Received October 15, 2021; Revised November 15, 2021; Accepted November 24, 2021)

Abstract: The quench voltage of the second-generation superconducting wire is affected by the resistivity characteristics of the stabilization layer. The specific resistance of the stabilization layer can be changed by the deposition process using RF magnetron sputtering. In this paper, a thin film made of a homogeneous material (Ag) and a dissimilar material (Cu) was deposited on the stabilization layer of the second-generation superconducting wire through RF magnetron sputtering. We found that the specific resistance was reduced by increasing the thickness of the stabilization layer. The reduction in the resistivity of the stabilization layer led to a decrease in the quench voltage of the second-generation superconducting wire. We suggest that various characteristic changes of the second-generation superconducting wire can be expected through the successful change in the resistivity of the stabilization layer of the proposed deposition process.

Keywords: Second-generation superconducting wire, RF magnetron sputtering deposition, Ag and Cu thin film, Resistivity characteristics of the stabilization layer

1. 서론

2세대 초전도 선(second-generation high-temperature superconducting wire, 2G HTS wire)은 높은 임계 전류 밀도와 우수한 자장 특성을 가지고 있다. 또한, 2세대 초전도 선의 물리적 변화에 따라 특성의 변화를 도모할 수 있다. 2세대 초전도 선의 특성 변화를 극저온 전력기기 분야

에 적용하기 위한 다양한 연구가 진행되고 있다 [1,2].

2세대 초전도 선은 다층의 박막으로 이루어져 있으며, 최외각에 위치한 안정화 층은 내부에 있는 초전도 (GdBa₂Cu₃O_{7-X}, GdBCO) 층을 보호하는 역할을 한다 [3,4]. 초전도 층을 보호하는 역할 외에 안정화 층의 물리적 변화는 2세대 초전도 선의 전기적 특성에도 영향을 줄 수 있다. 안정화 층은 가장 외각에 위치하고 있어 물리적 변화를 도모하기 위한 접근이 용이하고, 안정화 층의 물리적 변화는 2세대 초전도 선의 퀠치 전압(Quench voltage)에 영향을 준다 [5-7]. 안정화 층의 물리적 변화를 통한 2세대 초전도 선의 전기적 특성 변화는 극저온 전력기기 분야 적용에 다각화를 가져올 수 있다. 또한, 안정화 층의 소

✉ Sung-Chae Yang; yangsc@jbnu.ac.kr

Copyright ©2022 KIEEME. All rights reserved.

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

재변화는 고가의 은(Ag)을 대체할 수 있는 가능성을 제시할 수 있어, 초전도 선의 가격 경쟁력을 도모할 수 있을 것으로 사료된다.

스퍼터링을 이용한 증착 방식은 2세대 초전도 선 안정화 층 제조에 사용되며, 추가적으로 안정화 층 위에 여러 물질의 박막을 증착하여 두께를 증가시킬 수 있다. 또한, RF Magnetron Sputtering은 비교적 낮은 온도환경을 제공하는 증착공정이 가능하여 2세대 초전도 선의 손상 및 성능저하를 방지함과 동시에 안정화 층 위에 추가적인 박막층을 증착할 수 있다 [8]. 추가로 증착된 박막의 구성물질 및 두께로 인해 안정화 층의 비저항 변화가 예상되며, 안정화 층의 비저항 변화는 2세대 초전도 선의 전반적인 비저항을 변화시켜 전기적 특성에 영향을 줄 수 있다.

따라서 본 논문에서는 2세대 초전도 선 안정화 층의 구조변화에 따른 비저항을 변화시키기 위해 RF Magnetron Sputtering를 사용하여 안정화 층 위에 동종물질(Ag)과 이종물질(Cu)로 이루어진 박막을 추가로 증착하여 총 4개의 샘플을 제작하였고, 박막의 증착 상태를 분석하였다. 그리고 추가된 안정화 층의 구성물질 및 두께 증가에 따른 비저항 변화가 2세대 초전도 선의 전반적인 비저항에 미치는 영향을 확인하기 위해 4개의 샘플에 교류 과전류를 인가하여 퀘치 전압을 측정하였다.

2. 실험방법

2.1 세대 초전도 선

본 논문에서 사용한 2세대 초전도 선은 미국 Super Power사에서 제작한 SF4050이다. 그림 1은 SF4050의

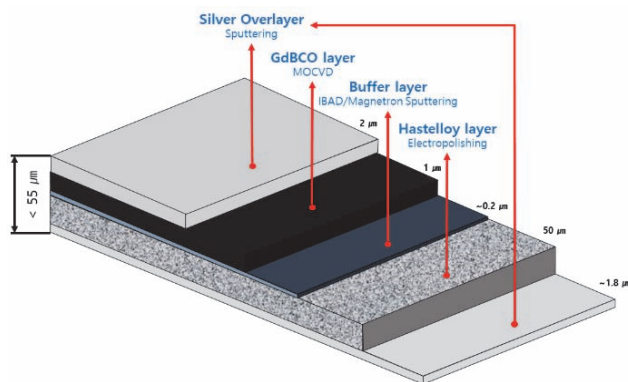


Fig. 1. Structure of superconducting wire.

구조를 보여준다. 2세대 초전도 선은 세라믹 및 금속 박막이 다층의 형태로 구성되어 있고, 너비는 4 mm이며, 두께는 55 μm 이다. Hastelloy 층이 50 μm 두께로 가장 두꺼우며, 하면에는 안정화 층이 증착되어 있고, 상면에는 Buffer 층, GdBCO 층 그리고 마지막으로 안정화 층이 순서대로 증착되어 있다. 앞서 언급한대로 안정화 층은 Ag로 이루어진 박막으로 최외각에 위치하며 GdBCO 층을 보호하는 역할을 한다. 그림 2는 FE-SEM 단면 이미지를 통해 2세대 초전도 선의 상부 안정화층의 두께를 측정된 결과이다. 실제 증착된 Ag 층의 두께는 2 μm 보다 적은 1.63 μm 가 측정되었다.

2.2 RF Magnetron Sputtering 증착공정

본 연구에서는 2세대 초전도 선에 박막을 증착하지 않은 경우와 박막을 증착한 경우를 비교하기 위해 안정화 층 위에 박막이 증착된 4개의 샘플을 준비하였다. 그림 3은 RF Magnetron sputtering 증착 방법의 개략도를 보여준다. 열에 의한 2세대 초전도 선의 손상 및 성능저하를 방지하기 위해 증착공정 중에 열처리를 하지 않았으며, 증착공정 동안에 측정된 기판의 최대온도는 68.66 $^{\circ}\text{C}$ 였다. 표 1에 제시된 조건으로 증착했을 때, Ag 박막의 증착 속도는 40 nm/min이었으며, Cu 박막의 증착 속도는 17.17 nm/min이었다. 먼저 안정화 층과 동종물질로 이루어진 박막을 약 2 μm 와 약 3 μm 두께로 증착하기 위해 Ag 타겟을 사용하여 50 min과 75 min 동안 증착을 진행하였다. 또한, Cu 타겟을 사용하여 Cu 박막을 약 2 μm 와 약 3 μm 두께로 추가하기 위해 117 min과 175 min 동안 증착하였다.

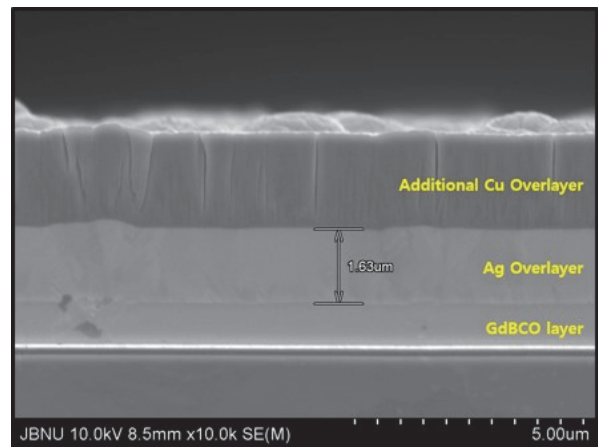


Fig. 2. FE-SEM image of cross-section (SF4050).

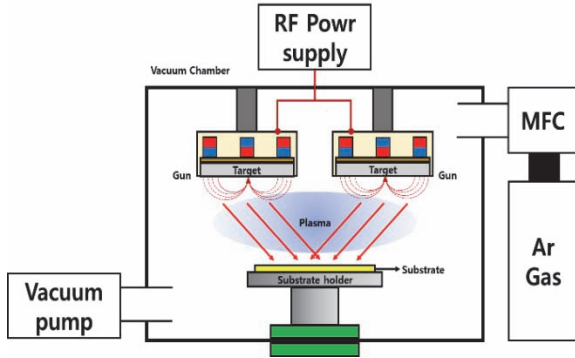


Fig. 3. The schematic diagram of the rf magnetron sputtering deposition method.

3. 결과 및 고찰

그림 4는 2세대 초전도 선의 안정화 층 위에 동종물질인 Ag로 증착한 2개 샘플의 단면을 FE-SEM의 이미지로 보여준다. 추가로 Ag 박막을 증착한 결과, Ag를 50 min 동안 증착하였을 때, 안정화 층의 두께는 1.63 μm 에서 3.63 μm 로 증가하였고, 증착된 Ag 박막의 두께는 2.00 μm 로 볼 수 있다. 또한, Ag를 75 min 동안 증착하였을 때, 2.98 μm 두께의 Ag 박막이 증착되었고, 안정화 층의 두께는 1.63 μm 에서 4.61 μm 로 증가하였다. 증착한 Ag 박막의 상태를 분석한 결과, 기존 안정화 층과 증착된 Ag 박막이 구별되지 않았고, 제대로 증착이 되지 않았을 때 보이는 들뜸 현상이 보이지 않았다. 이는 동종물질로 이루어진 Ag 박막의 추가 증착이 잘 이루어졌다고 판단된다.

그림 5는 2세대 초전도 선의 안정화 층 위에 이종물질인 Cu를 추가로 증착한 2개 샘플의 단면을 FE-SEM 이미지

Table 1. Magnetron sputtering deposition conditions.

Process condition	Value
Basic vacuum	1.8×10^{-6} Torr
Deposition vacuum	10×10^{-3} Torr
Gun power	100 W
Gas	Ar
Gas flow	25 sccm
Target	Ag (99.99 %), Cu (99.99 %)

로 보여준다. Cu를 117 min 동안 증착하였을 때, Cu 박막은 안정화 층 위에 2.06 μm 두께로 증착되었다. 또한, 3.04 μm 두께의 Cu 박막을 175 min 동안 증착하여 안정화 층 위에 추가하였다. 증착된 Cu 박막의 상태를 분석한 결과, 안정화 층과 이종물질로 구성된 Cu 박막은 확연히 구별되었고, 기존 안정화 층과 Cu 박막 사이의 들뜸 현상이 보이지 않았기 때문에 Cu 박막의 추가 증착도 잘 이루어졌다고 사료된다.

따라서 RF Magnetron Sputtering 증착공정을 통해 안정화 층과 동종물질 및 이종물질로 이루어진 박막을 각각 약 2 μm 와 약 3 μm 두께로 추가 증착하였고, 증착된 박막상태는 이상이 없다고 판단된다. 추가로 증착된 박막의 두께와 물질에 따라 안정화 층의 비저항은 변화되었고, 이로 인해 2세대 초전도 선의 물리적 특성 또한 변화되었을 것으로 예상된다.

2세대 초전도 선의 비저항 특성을 확인하기 위해 박막이

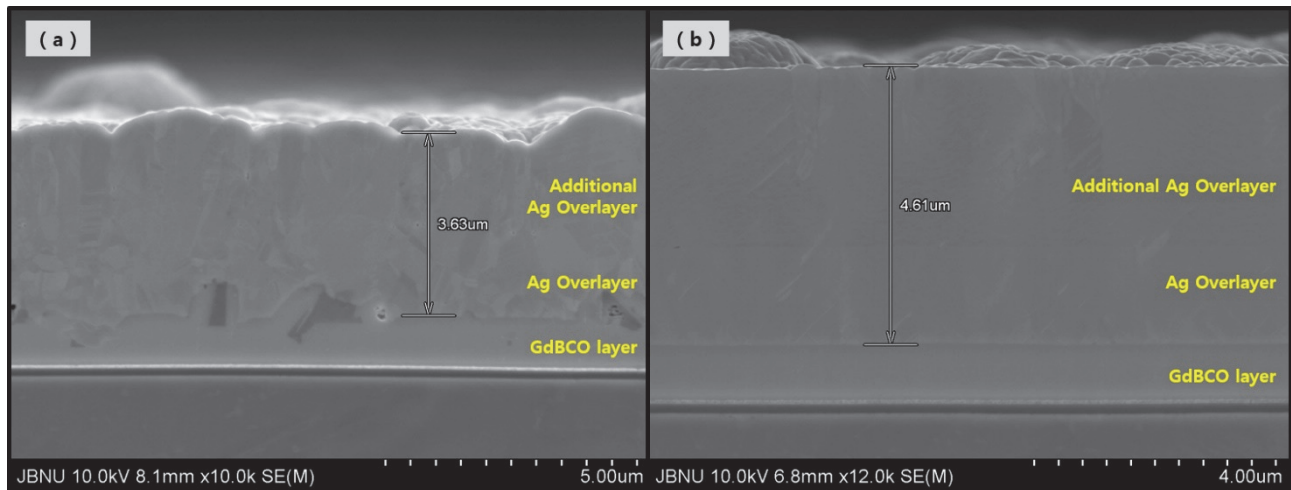


Fig. 4. FE-SEM image of cross-section additional deposition (a) Ag 50 min and (b) Ag 75 min.

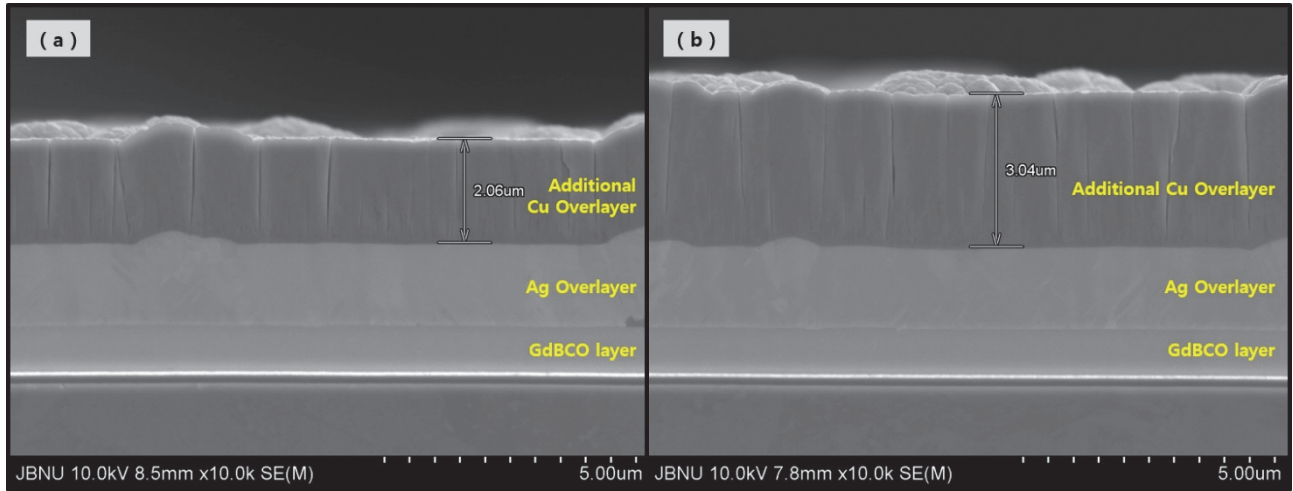


Fig. 5. FE-SEM image of cross-section additional deposition (a) Cu 117 min (b) Cu 175 min.

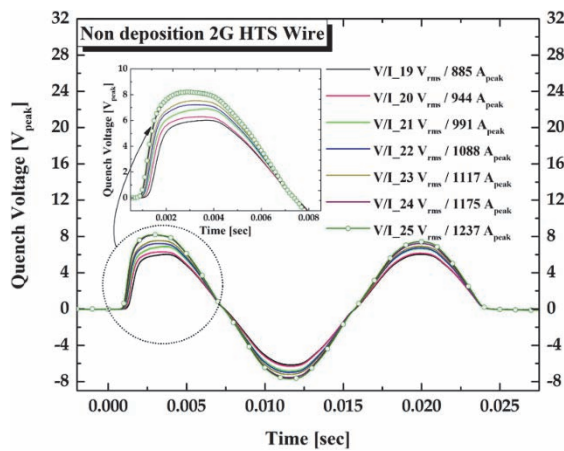


Fig. 6. Quench voltage of 2G HTS wire.

추가 증착된 샘플 4종과 추가 증착되지 않은 샘플 1종에 대한 교류 과전류 통전시험을 진행하고, 이때 발생하는 퀘치 전압을 측정하였다. 그림 6, 7, 8은 2세대 초전도 선에 885 $A_{peak} \sim 1,237 A_{peak}$ 의 동일한 교류 과전류를 통전하였을 때 측정된 퀘치 전압을 나타낸 그래프이다. 그림 6은 추가로 박막을 증착하지 않은 2세대 초전도 선의 퀘치 전압을 보여준다. 인가 전압이 19 $V_{rms} \sim 25 V_{rms}$ 로 증가하였을 때 측정된 퀘치 전압은 약 6 $V_{peak} \sim$ 약 8 V_{peak} 로 측정되었다. 인가 전압이 증가하면 통전되는 교류 과전류가 증가하고, 교류 과전류의 값이 커지면 2세대 초전도 선에 발생하는 저항도 커지게 되어 측정되는 퀘치 전압도 증가하게 된다.

그림 7은 안정화 층과 동종물질로 이루어진 Ag 박막이 추가 증착된 2세대 초전도 선의 퀘치 전압을 보여준다. 두께가 약 2 μm 인 Ag 박막을 증착한 샘플의 퀘치 전압은 약

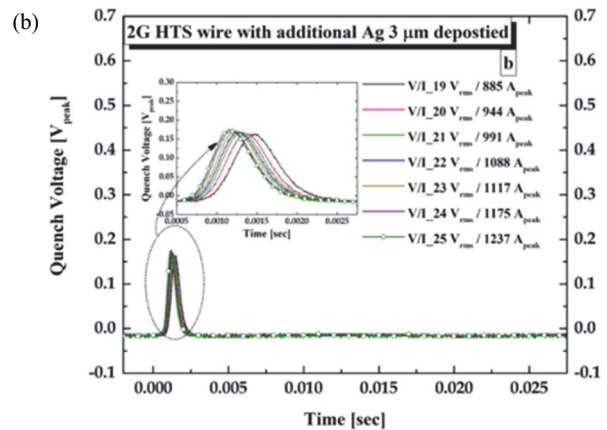
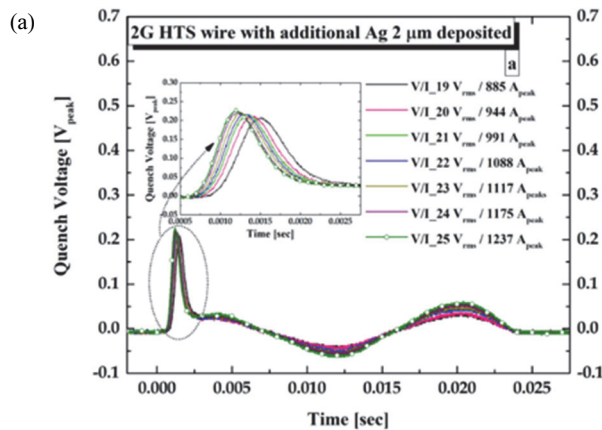


Fig. 7. Quench voltage of 2G HTS wire additional deposition (a) Ag 2 μm and (b) Ag 3 μm .

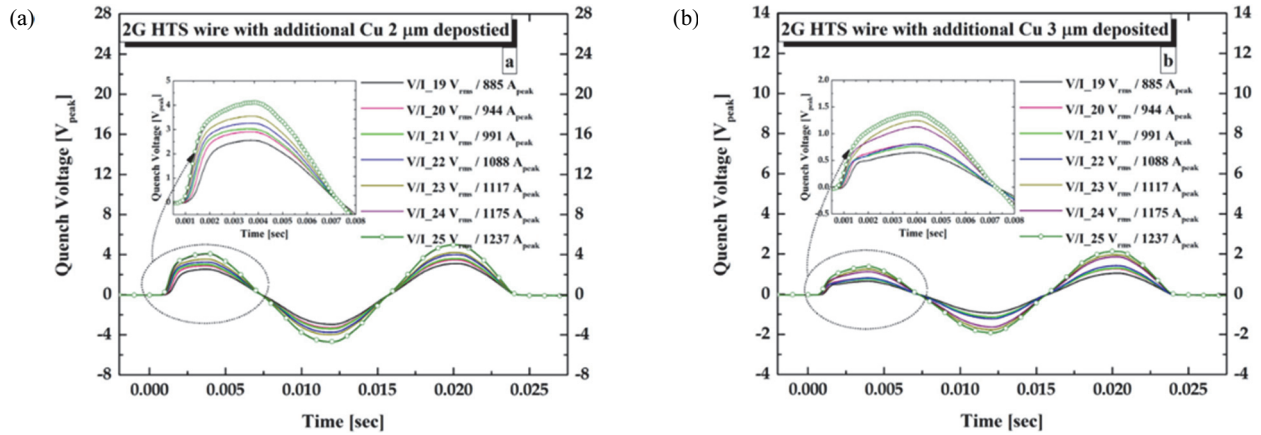


Fig. 8. Quench voltage of 2G HTS wire additional deposition (a) Cu 2 μm (b) Cu 3 μm .

0.2 V_{peak} 로 측정되었다. 또한, Ag 박막이 약 3 μm 로 추가 증착된 경우에 측정된 퀠치 전압은 약 0.15 V_{peak} 이었다. 안정화 층의 두께가 증가하여 비저항이 낮아졌기 때문에 동일한 교류 과전류 조건에서 퀠치 전압은 박막을 증착하지 않은 경우보다 감소하였다고 판단된다.

안정화 층과 이종물질로 이루어진 Cu 박막이 추가 증착된 2세대 초전도 선에 교류 과전류를 통전하였을 때 측정된 퀠치 전압은 그림 8에서 볼 수 있다. Cu 박막이 2 μm 두께로 추가 증착된 경우에 퀠치 전압은 약 2.5 V_{peak} ~ 약 4 V_{peak} 로 측정되었다. 그리고 3 μm 두께의 Cu 박막이 추가로 증착된 샘플의 퀠치 전압은 약 0.5 V_{peak} ~ 약 1.5 V_{peak} 로 측정되었다. Ag 박막을 추가 증착한 경우와 마찬가지로, Cu 박막을 추가 증착함으로써 안정화 층의 비저항이 감소하여 퀠치 전압이

감소했다고 사료된다. 다만, Cu는 Ag 보다 비저항이 높기 때문에 동일한 두께의 Ag 박막을 추가 증착한 경우보다 안정화 층의 비저항 감소가 적다. 그 영향으로 Cu 박막을 증착한 샘플의 퀠치 전압의 감소폭이 Ag 박막을 증착한 샘플의 경우보다 적었다고 판단된다.

4. 결론

본 논문에서는 2세대 초전도 선 안정화층 구조변화가 비저항 특성에 미치는 영향을 확인하기 위해 안정화 층 위에 박막을 추가 증착하고 교류 과전류를 인가하여 발생하는 퀠치 전압을 측정하였다.

RF Magnetron Sputtering을 사용하여 약 2 μm 와 약 3 μm 두께의 Ag 박막과 Cu 박막을 추가 증착하고, FE-SEM을 통해 박막의 증착 상태를 확인하였다. 2세대 초전도 선

에 적용된 RF Magnetron Sputtering 증착공정은 의도된 조건에 따라 진행되었으며, 추가된 박막과 기존 박막 간의 들뜸 현상은 발생하지 않았다.

아울러, 박막이 추가 증착되어 만들어진 안정화 층의 구조변화가 2세대 초전도 선의 물리적 변화(비저항)에 미치는 영향을 확인하기 위해 교류 과전류를 2세대 초전도 선에 인가하여, 발생하는 퀠치 전압을 측정하였다. 측정된 결과로부터, 두께가 증가함에 따라 퀠치 전압은 감소되었다. 또한, 증착된 물질의 물성적 특성에 따라 초전도 선의 비저항 특성이 영향을 받는 것을 확인하였다.

따라서 RF Magnetron Sputtering을 이용한 증착공정은 2세대 초전도 선의 안정화 층에 두께 및 물질 변화를 가져올 수 있고, 이를 통해 2세대 초전도 선의 비저항 특성이 영향을 받는다고 볼 수 있다. 이는 2세대 초전도 선의 극저온 전력기기 적용분야 다각화 및 안정화 층 소재대체를 통한 원가절감의 가능성을 제시한다.

ORCID

Sung-Chae Yang

<https://orcid.org/0000-0002-2494-7616>

감사의 글

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2021R1A2C1013385).

REFERENCES

- [1] P. Tixador, *Superconducting Fault Current Limiter*, Chapter 11-15 (World Scientific, New Jersey, 2019).
- [2] T. Watanabe, Y. Shiohara, and T. Izumi, *IEEE Trans. Appl. Supercon.*, **13**, 2445 (2003). [DOI: <https://doi.org/10.1109/TASC.2003.811818>]
- [3] H. I. Du and S. C. Yang, *IEEE Trans. Appl. Supercon.*, **26**, 5602704 (2016). [DOI: <https://doi.org/10.1109/TASC.2016.2545107>]
- [4] H. I. Du, H. G. Jeong, S. J. Ban, and S. C. Yang, *IEEE Trans. Appl. Supercon.*, **30**, 5602005 (2020). [DOI: <https://doi.org/10.1109/TASC.2020.2980530>]
- [5] H. I. Du, Y. J. Kim, D. H. Lee, B. S. Han, S. S. Song, M. J. Kim, and S. C. Han, *IEEE Trans. Appl. Supercon.*, **21**, 1238 (2011). [DOI: <https://doi.org/10.1109/TASC.2010.2100792>]
- [6] H. I. Du, S. C. Yang, and H. G. Jeong, *IEEE Trans. Appl. Supercon.*, **27**, 5601306 (2017). [DOI: <https://doi.org/10.1109/TASC.2017.2656779>]
- [7] H. I. Du, H. G. Jeong, S. J. Ban, and S. C. Yang, *IEEE Trans. Appl. Supercon.*, **30**, 5602105 (2020). [DOI: <https://doi.org/10.1109/TASC.2020.2980532>]
- [8] T. C. Gorjanc, D. Leong, C. Py, and D. Roth, *Thin Solid Films*, **413**, 181 (2002). [DOI: [https://doi.org/10.1016/S0040-6090\(02\)00425-X](https://doi.org/10.1016/S0040-6090(02)00425-X)]