

Fabrication of 6-superconducting layered HTS wire for high engineering critical current density

Gwantae Kim^a, Hongsoo Ha^{*a}, Hosup Kim^a, Sangsoo Oh^a, Jaehun Lee^b, and Seunghyun Moon^b

^a Superconductivity Research Center, Korea Electrotechnology Research Institute, Changwon, Republic of Korea

^b SuNAM Co. Ltd., Ansung, Republic of Korea

(Received 22 November 2021; revised or reviewed 30 November 2021; accepted 1 December 2021)

Abstract

Recently, cable conductors composed of numerous coated conductors have been developed to transport huge current for large-scale applications, for example accelerators and fusion reactors. Various cable conductors such as CORC (Conductor on round core), Roebel Cable, and TSTC (Twisted stacked tape cable) have been designed and tested to apply for large-scale applications. But, these cable conductors cannot improve the engineering critical current density (J_e) because they are made by simple stacking of coated conductors. In this study, multi-HTS (High temperature superconductor) layers on one substrate (MHOS) wire was fabricated to increase the engineering critical current density by using the exfoliation of superconducting layer from substrate and silver diffusion bonding method. By the repetition of these processes, the 10 m long 6-layer MHOS conductor was successfully fabricated without any intermediate layers like buffer or solder. 6-layer MHOS conductor exhibited a high critical current of 2,460A/12mm-w. and high engineering critical current density of 1,367A/mm² at liquid nitrogen temperature.

Keywords: engineering critical current density, coated conductor, MHOS, fusion, accelerator

1. INTRODUCTION

1986년 고온초전도체가 발견된 이후 HTS 선재의 상용화를 위한 많은 연구 개발이 이루어져 왔다[1]. 다양한 HTS 재료 중 REBCO는 높은 임계 온도와 높은 상부 임계 자기장(H_{c2}) [2, 3] 때문에 많은 주목을 받아왔으며 현재 우수한 자기장하 통전특성을 지닌 박막선재(Coated conductor 또는 2nd generation HTS wire로 불리워짐) 형태로 개발되고 있다. 단일 초전도층으로 이루어진 박막 선재는 통전특성 향상에 한계가 있어서 수 kA 이상의 대전류 통전을 위해 CORC, TSTC, Roebel 과 같은 대용량 도체가 개발되고 있다[4-6]. 이러한 대용량 도체는 다수의 고온초전도 박막선재를 적층하거나, 감싸거나 또는 꼬아서 제조하며 대용량 응용기에 적용하기 위하여 많은 연구가 이루어지고 있다. 고온초전도 박막선재를 단순히 적층하거나 꼬아서 제조된 대용량 도체는 많은 전류를 통전할 수 있지만 실제 응용기에 적용 시 성능향상에 영향을 미치는 공학적 임계전류밀도(J_e)는 향상되지 않는다[7, 8]. 최근 공학적 임계전류밀도를 향상시키기 위해 금속 기판의 두께를 줄이거나 초전도 층의 두께를 증가시키는 방법이 개발되고 있다[9, 10].

본 연구에서는 공학적 임계전류밀도를 향상시키기 위해 고안된 새로운 방법[11]으로 하나의 기판에 여러 개의 초전도층으로 이루어진 HTS 도체(이하 MHOS 도체로 명명)를 개발하고자 하였다. 고온초전도 박막선재의 전체 단면적에서 초전도층이 차지하는 면적은 1~2% 내외로 매우 작다. 따라서 하나의 기판 위에 초전도층을 복수로 적층하면 단일도체에서 매우 높은 통전특성을 얻을 수 있을 것이다. 한편, 고온초전도 박막선재는 초전도층과 버퍼층 사이의 결합력이 낮아 두께 방향(C-axis) 인장강도가 수십 MPa 이하로 매우 낮다. 이 특성을 이용하여

고온초전도 박막선재로부터 초전도층을 쉽게 분리할 수 있고, 분리된 초전도층을 반복적으로 쌓으면 복수의 초전도층으로 이루어진 다층 MHOS 도체를 만들 수 있다. 이때 초전도층간의 접합은 납땜법을 사용하지 않고 초전도층 위에 은(Ag)을 코팅한 후 확산접합 열처리하였다. 단층으로 이루어진 고온초전도 박막선재로부터 다층화 공정을 반복하여 다층 MHOS 도체를 제조할 수 있으며 대표적인 단면형상을 Fig. 1에 나타내었다. MHOS 도체 제조기술을 바탕으로 10m 길이 6층 MHOS 도체를 개발하고자 하였다. 제조된 6층 MHOS 도체의 전체 선재 길이 방향 임계전류 특성과 자기장중 통전특성을 평가하였으며 아울러 미세조직을 관찰하여 통전특성과의 관계를 비교 분석하였다.

2. EXPERIMENTAL

복수의 초전도층으로 이루어진 MHOS 도체를 제조하기 위해 일반적으로 판매되고 있는 단층 고온초전도 박막선재를 이용하였다. 하지만 은 확산접합 열처리를 위하여 초전도층 상부에 은만 코팅된 상태로 이용하였다. 먼저 초전도층이 마주보도록(face-to-face) 2개의 고온초전도 박막선재를 Fig. 2와 같이 배치한 후 5 MPa의

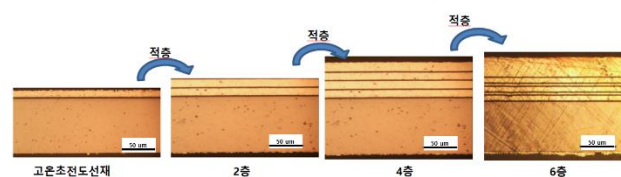


Fig. 1. Cross sections of MHOS conductors (2, 4, and 6 superconducting layers).

* Corresponding author: hsha@keri.re.kr

압력으로 하스텔로이 기판을 초전도 박막선재와 함께 동시 권선하였다. 초전도층 사이에 있는 은층 간의 접합을 위하여 은 확산접합 열처리를 하였으며 열처리 조건은 Table 1에 나타내었다. 이후 Fig. 2와 같이 두 가닥의 고온초전도 박막선재가 확산접합에 의해 한 가닥으로 접합된 것을 분리 장치를 이용하여 분리하였다. 이때 초전도층이 2개로 이루어진 MHOS 도체와 초전도층을 잃어버리고 완충층만 남은 기판으로 분리되었다. 2층 MHOS 도체의 표면을 다시 DC magnetron 스퍼터를 이용하여 은을 약 $1.25 \mu\text{m}$ 두께로 입혔다. 이후 이전 권선 방식과 같이 권선 후 제조공정을 반복하여 4층 MHOS 도체를 제조하였다. 이후 4층 MHOS 도체와 2층 MHOS 도체를 접합하여 6층 MHOS 도체를 제조하였다.

은 확산 접합된 초전도층을 안정적으로 분리하기 위하여 초전도층과 완충층 사이에서 분리가 이루어지도록 특별히 고안된 분리 장치를 사용하였으며 Fig. 3에 분리장치 및 분리된 표면을 나타내었다. 최종적으로 제조된 10m 길이 6층 MHOS 도체의 통전 특성 및 자기장하 통전특성을 평가하였으며 전자현미경 (Hitachi 사 모델명 S-4800)을 사용하여 단면을 분석하고 임계전류 특성과의 상관관계를 분석하였다.

3. RESULT AND DISCUSSION

고온초전도 박막선재의 초전도층을 다층화 하기 위해 많은 연구들을 수행해 왔으나, 우수한 성능의 다층 고온초전도 박막선재를 제조하지 못하였다[12]. 박막 증착법을 이용하여 다층 초전도 박막선재를 제조할 경우 초전도층 및 완충층을 번갈아 증착하는데 이때 증착 두께가 두꺼워질수록 이축배향 특성이 급격히 저하한다.

이에 따라 초전도 특성도 함께 저하함으로써 우수한 성능의 다층 초전도 박막선재를 제조하는 것이 매우 어렵다.

본 연구에서는 기존 박막증착 법이 아닌 물리적인 방법으로 초전도층의 분리 및 접합공정을 통하여 초전도층을 다층화하였다. 긴 길이의 고온초전도 박막선재를 균일하게 가압한 상태에서 확산접합 열처리하기 위하여 팬케이크 코일 권선에 사용되는 권선기를 활용하였다. 고강도 금속기판(Hastelloy C-276,

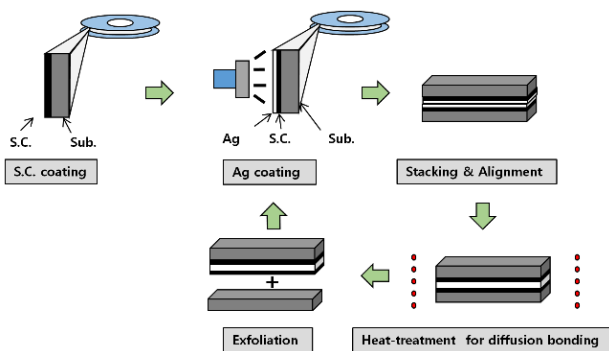


Fig. 2. Fabrication procedures of MHOS conductor.

TABLE 1
HEAT-TREATMENT CONDITIONS FOR AG DIFFUSION BONDING.

Stacking manner	Face to face
Bonding pressure	5 Mpa
Diffusion heat-treatment	600°C x 2 h 1 atm O ₂
No. of Superconducting layers.	6

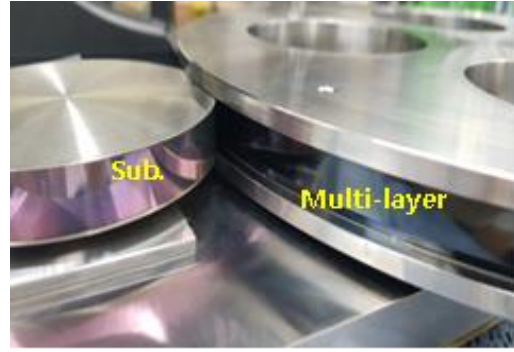


Fig. 3. Exfoliation jig to separate MHOS conductor and substrate

폭 12mm, 두께 0.07mm)을 초전도선재 2개와 함께 권선하여 확산접합을 위한 압력을 길이방향으로 균일하게 인가하였다. 다양한 권선압력하에서 확산접합 열처리를 실시하였으며 열처리 후 분리기술 개발을 위해 고온초전도 박막선재의 낮은 C-축 인장강도를 활용하였다[14]. 비교적 용이하게 초전도층을 분리할 수 있었으며 다양한 분리 표면 형상을 Fig. 4에서 나타내었다.

분리시 권선 압력이 낮은 경우 Fig. 4(a)와 같이 확산접합이 균일하게 되지 않고 부분적으로 은층이 남아 있는 것을 알 수 있었다. 권선 압력을 증가시켰을 때 5MPa 이상에서는 안정적으로 분리가 일어났으나 Fig. 4(b)와 같이 선재의 모서리 부분이 접합되지 않은 현상이 나타났다. 이것은 고온초전도 박막선재 제조에 사용된 금속기판의 표면을 전해연마시 모서리부분이 상대적으로 많이 식각 됨으로 인해 발생한 것으로 판단된다. 금속기판의 모서리부분이 상대적으로 많이 식각되지 않은 경우 Fig. 4(c)와 같이 전체 표면에서 초전도층이 완전히 분리되는 것을 확인하였다.

최적의 확산접합 및 분리공정을 이용하여 10m 길이의 6층 MHOS 도체를 제조하였으며 Fig. 5(a)에 외관 사진을 나타내었다. 10m 전체의 임계전류 특성을 평가하기 위하여 Hall- I_c 측정장치를 이용하였으며 그 결과를 Fig5(b)에 나타내었다.

길이방향으로 비교적 균일한 특성을 나타내었으며 9m 근방에서 임계전류 특성이 저하하는 결함 부위가 관찰되었다. 이것은 MHOS 도체의 제조시 여러 번 제조공정을 반복하면서 발생하는 취급 부주의로 인한 것으로 판단된다. 6층 MHOS 도체의 실제 통전특성을 확인하고자 쏫 샘플을 이용하여 임계전류를 측정하였다. 통전 전류 용량이 클 것으로 예측되어 영구자석으로 0.85T의 수직 자기장을 인가한 후 쏫샘플의 임계전류를 측정하였고, Fig. 6(a)에 영구자석과 측정치구의 외관을

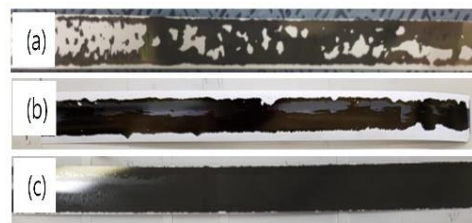


Fig. 4. Exfoliated surfaces of MHOS conductors with 12mm-w. (a) heat-treated under low diffusion bonding pressure (b) used thinner edged coated conductors (c) exfoliated completely

나타내었다. 직류 4 단자법으로 임계전류를 측정된 결과 0.85T, 77K 에서 615A/12mm-w. 의 임계전류 값을 측정하였고 이를 Fig. 6(b)에 나타내었다. 다층 선재 제조에 사용된 고온초전도 박막선재의 I_c -B-T 특성 그래프 Fig. 6(c)는 사용된 선재에 인가되는 자장, 온도에 따른 임계전류 분포를 나타내고 본 실험에 인가한 자장 값으로 유추해볼 때 약 25% 임계전류 감소폭을 알 수 있었다. 이를 이용하여 계산한 결과 self-field, 77K, 에서 2,460A/12mm-w. 의 임계전류 값이 예측되었다. 아울러 6층 MHOS 도체 전체 단면적 대비 통전특성을 나타내는 공학적 임계전류 밀도는 $1,367 \text{ A/mm}^2$ 로 매우 우수하였다. 높은 공학적 임계전류밀도를 나타낸 6층 MHOS 도체의 단면을 분석하고자 전자현미경을 이용하였다. 표면 형상을 관찰하여 Fig. 7(a)에서 볼 수 있듯이 확산접합 열처리 후 완충층과 분리될 때 초전도층 표면에 균열이 일어나지 않은 것을 관찰할 수 있었다. 6층 MHOS 도체의 단면 또한 Fig. 7(b)에서 볼 수 있듯이 초전도 층과 은과의 접합이 매우 깨끗하게 형성되어 있으며 균열이나 파손이 일어나지 않았음을 확인할 수 있었다. 그리고 초전도층 사이에 존재하는 은층에는 확산접합이 완벽하게 이루어져서 은층간의 계면이 존재하지 않음을 확인할 수 있었다. 초전도층 사이의 은층의 두께가 다른 이유는 최초 초전도 선재 제조사에서 코팅된 은의 두께가 $5\mu\text{m}$ 로 매우 두꺼워 2층 MHOS 도체 제조시 두 은층이 확산접합 되고 난 후 $10\mu\text{m}$ 가 됨으로써 공학적 임계전류밀도를 저하시키는 결과를 나타내었다. 이후 4층 및 6층 MHOS 도체 제조시 최적화된 두께 ($1.25\mu\text{m}$)로 은층을 증착하여 다층화 하였고, 초전도층간은 두께를 $2.5\mu\text{m}$ 로 최적화 할 수 있었다. 따라서 향후 고온초전도 박막선재의 최초 구입시 은 두께를 $1.25\mu\text{m}$ 로 할 경우 6층 MHOS도체의 전체 두께를 $130\mu\text{m}$ 에서 $108.5\mu\text{m}$ 로 줄임으로써 공학적 임계전류밀도를 약 15% 정도 향상 시킬 수 있을 것으로 기대된다.

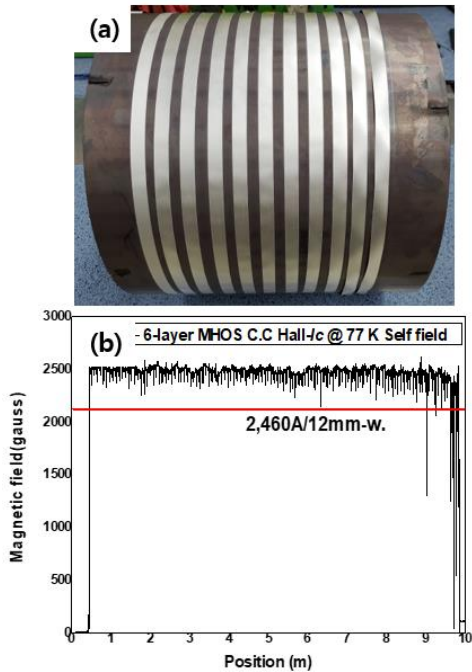


Fig. 5. Characteristics of 6-layer MHOS conductor. (a) Outlook of 10m long 12mm-w. 6-layer MHOS conductor and (b) Result of critical current measurement using Hall sensor, $J_c = 2,460 \text{ A/12mm-w.}$ (Sample size: 12mm-w. x 0.13mm-t.)

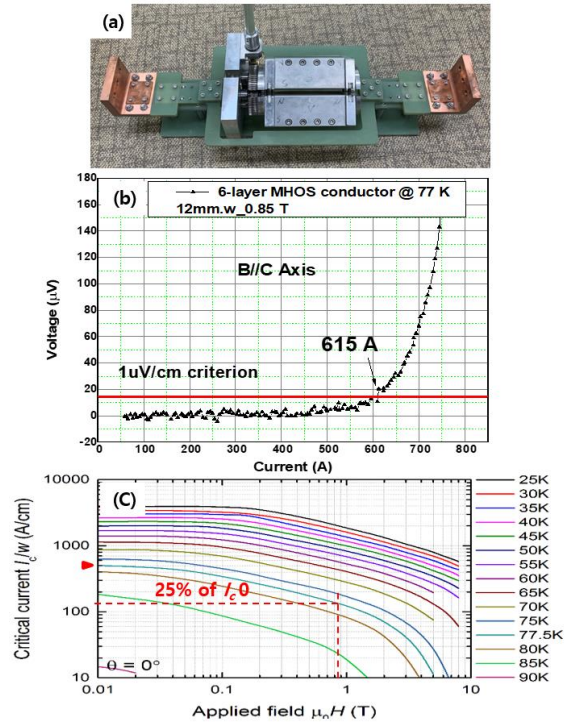


Fig. 6. Transport current measurement of 6-layer MHOS conductor (a) I_c -B measurement apparatus (b) critical current of 6-layer MHOS conductor at 77 K 0.85T. (c) I_c -B-T characteristics of as-received coated conductor [13]

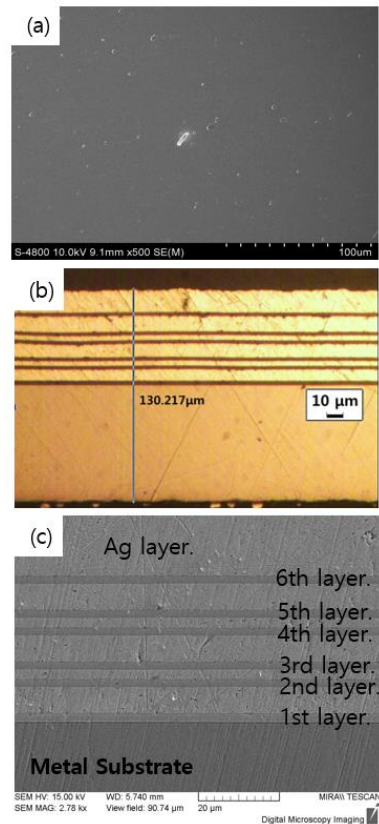


Fig. 7. Microscopy of 6-layer MHOS conductor. (a) Surface of superconducting layer (b) Thickness of 6-layer MHOS conductor (C) Cross-section of 6 superconducting layers in MHOS conductor

4. CONCLUSION

본 연구에서는 은 확산접합 및 분리 공정 적용을 통해 공학적 임계전류 밀도가 높은 10m 6층 MHOS 도체를 제조하였고 다음의 결과를 얻었다.

5MPa의 가압력으로 확산접합 열처리한 후 분리하는 방법으로 제조된 6층 MHOS 도체는 초전도층과 완충층 사이에 분리가 비교적 안정적으로 일어났다.

10m 6층 MHOS 도체의 통전특성은 0.85T, 77K에서 임계전류 $I_c=615A/12mm-w.$ 의 값으로 측정되었으며, 공학적 임계전류밀도는 self-field, 77K에서 $J_e = 1,367 A/mm^2$ 의 값으로 아주 우수한 공학적 임계전류밀도를 나타내었다. 6층 MHOS 도체의 표면 및 단면분석결과 양호한 은 확산접합으로 초전도층과 은층 사이의 접합이 균일하게 형성되었으며 은층간의 접합도 매우 양호하였다. 은 확산접합을 위해 필요한 은층의 두께 최적화가 필요하다 판단되고, 향후 초전도 박막선재 제조사에서 은층의 두께를 최적화 한다면 15% 이상의 공학적 임계전류밀도 향상이 기대된다.

ACKNOWLEDGMENT

This research was supported by Korea Electro technology Research Institute (KERI) primary research program through the National Research Council of Science & Technology (NST) funded by the Ministry of Science and ICT (MSIT) (No. 21A01019).

REFERENCES

- [1] Bednorz, J. George, and K. Alex Müller. "Possible high T_c superconductivity in the Ba-La-Cu-O system." *Zeitschrift für Physik B Condensed Matter* 64.2: 189-193, 1896.
- [2] Schilling, A., et al. "Superconductivity above 130 K in the Hg-Ba-Ca-Cu-O system." *Nature* 363.6424: 56-58, 1993.
- [3] Larbalestier, David C., et al. "Isotropic round-wire multifilament cuprate superconductor for generation of magnetic fields above 30 T." *Nature materials* 13.4: 375-381, 2014.
- [4] Ashok, K. B., et al. "Performance limits in REBCO tape for variation in winding parameters of CORC® cable and wire." *Physica C: Superconductivity and its Applications* 582: 1353828, 2021.
- [5] Ta, Wurui, Tianchong Shao, and Yuanwen Gao. "Comparison study of cable geometries and superconducting tape layouts for high-temperature superconductor cables." *Cryogenics* 91: 96-102, 2018.
- [6] Kovacs, C. J., et al. "Quench and stability of Roebel cables at 77 K and self-field: minimum quench power, cold end cooling, and cable cooling efficiency." *Cryogenics* 95: 57-63, 2018.
- [7] van der Laan, Daniel C., X. F. Lu, and Loren F. Goodrich. "Compact GdBa₂Cu₃O_{7-δ} coated conductor cables for electric power transmission and magnet applications." *Superconductor Science and Technology* 24.4: 042001, 2011.
- [8] Takayasu, Makoto, et al. "Present status and recent developments of the twisted stacked-tape cable conductor." *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* 26.2: 25-34, 2016.
- [9] Majkic, Goran, et al. "Engineering current density over 5 kA mm⁻² at 4.2 K, 14 T in thick film REBCO tapes." *Superconductor Science and Technology* 31.10: 10LT01, 2018.
- [10] Sundaram, A., et al. "2G HTS wires made on 30 μm thick Hastelloy substrate." *Superconductor Science and Technology* 29.10: 104007, 2016.
- [11] Ha, Hongsoo, et al. "Fabrication of 1 m long multi layered superconducting coated conductor with high engineering critical current density." *Superconductor Science and Technology* 33.4: 044007, 2020.
- [12] Solovyov, Vyacheslav, and Paul Farrell. "Exfoliated YBCO filaments for second-generation superconducting cable." *Superconductor Science and Technology* 30.1: 014006, 2016.
- [13] https://figshare.com/articles/dataset/Critical_current_characterisation_of_Fujikura_2G_HTS_superconducting_wire/3759321.
- [14] Diaz, Mark Angelo, et al. "Evaluation of Electromechanical Properties in Multiple HTS Layered Conductors at 77 K." *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* 31.5: 1-4, 2021.
- [15] Ha, Hongsoo, et al. "Fabrication of 1 m long multi layered superconducting coated conductor with high engineering critical current density." *Superconductor Science and Technology* 33.4: 044007, 2020.
- [16] Gupta, Ramesh, et al. "Hybrid high-field cosine-theta accelerator magnet R&D with second-generation HTS." *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* 25.3: 1-4, 2015.
- [17] Wang, Xiaorong, et al. "A viable dipole magnet concept with REBCO CORC® wires and further development needs for high-field magnet applications." *Superconductor Science and Technology* 31.4: 045007, 2018.
- [18] Takayasu, Makoto, Luisa Chiesa, and Joseph V. Minervini. "Development of termination methods for 2G HTS tape cable conductors." *IEEE transactions on applied superconductivity* 24.3: 1-5, 2013.
- [19] De Marzi, G., et al. "Bending tests of HTS cable-in-conduit conductors for high-field magnet applications." *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* 26.4: 1-7, 2016.
- [20] Emergo, R. L. S., et al. "Thickness dependence of superconducting critical current density in vicinal YBa₂Cu₃O_{7-δ} thick films." *Applied physics letters* 85.4: 618-620, 2004.