

Enhanced flux pinning property of $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ films by ferromagnetic surface decoration

C. Y. Song^a, J. Y. Oh^a, Y. J. Ko^a, J. M. Lee^b, W. N. Kang^b, and B. Kang^{a,*}

^a Department of Physics, Chungbuk National University, Cheongju, Korea

^b Department of Physics, Sungkyunkwan University, Suwon, Korea

(Received 24 April 2020; revised or reviewed 14 June 2020; accepted 15 June 2020)

Abstract

We investigated the flux pinning property of $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ (GdBCO) films on top of $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ (LSMO) nanoparticles deposited by a surface decoration. Both GdBCO films and LSMO nano particles were deposited by pulsed laser deposition and the number of laser pulses were varied from 80 to 320 in order to control the density of the LSMO nanoparticles. The magnetization data at 77 K showed that the critical current density (J_c) was enhanced in all of the GdBCO films with LSMO nanoparticles and that the J_c enhancement was found to be inversely proportional to the LSMO nanoparticle density. Structural analyses revealed that LSMO nanoparticles induce a compressive strain in the GdBCO films resulting in a disordering in the CuO_2 plane. Therefore, the enhanced flux pinning property in the GdBCO with LSMO nanoparticles was attributed to the competing effect between the increase of pinning centers and the increase of compressive strain in the superconducting phase.

Keywords: GdBCO, LSMO, surface decoration, flux pinning

1. 서 론

초전도체의 응용을 위해서는 높은 임계온도와 큰 임계전류밀도가 필수적이다. 이런 관점에서 다양한 초전도 물질 중에서 $\text{REBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ (REBCO, RE=Y, Gd, Sr, Eu) 초전도체가 액체 질소 온도(77 K) 이상의 높은 임계온도(T_c)를 갖는다는 것과 상대적으로 자기장 내에서 높은 임계전류밀도를 유지한다는 특성으로 인해 주목 받고 있다. REBCO는 cuprate 구조를 갖고 있으며 전하 저장층(charge reservoir layer), 절연층(insulating rock salt layer), CuO_2 층으로 나눌 수 있으며 직접적으로 초전류가 흐르는 CuO_2 층의 구조적인 변화가 초전도성과 밀접하게 연관되어 있다[1, 2].

현재까지 이러한 REBCO 계열 초전도체의 전력 응용(power application)으로의 주된 이슈는 자기장 내에서의 임계전류밀도의 향상이다. 임계전류밀도를 향상시키기 위한 방법으로 자속(magnetic flux) 제어 효과가 효과적이며 그러기 위한 다양한 방법이 존재한다. 내부에 BaMO_3 (M=Zr, Sn, Hf) 물질을 이용한 나노 기둥, 나노 입자 등의 인공 자속고정 중심(artificial pinning center)를 첨가하여 자속을 고정하거나[3-5] 이온 선속 방사(ion beam irradiation)를 통하여 인위적으로 초전도체 내에 원기둥 형태의 결함을 만드는 방법[6, 7], 그리고 기판 위에 인위적인 구조물을 만들어 그 위에 증착하는 초전도체에 인위적인 결함을 유도하여 자속을 고정하는 방법인 표면 장식(surface decoration)

방법[8, 9] 등이 존재한다. 최근에는 단순히 구조물을 이용하는 것이 아니라 강자성체를 이용하여 자성 특성에 의한 임계전류밀도의 향상이 연구되고 있다. 일반적으로 강자성체와 초전도체가 서로 접합되어 있을 경우 강자성체 내에 정렬된 전자들이 초전도체 내부로 유입되어 쿠퍼쌍을 깨뜨리는 pair-breaking 효과가 존재하며 초전도체 내에서도 강자성체로 쿠퍼쌍이 유입되어 초전도성이 낮아지는 근접효과(proximity effect)가 존재하기 때문에 초전도성의 향상을 위해서 강자성체의 사용은 꺼려왔다[10, 11]. 하지만 Bulaevskii의 이론[12]과 초전도/강자성체의 다중층, 이중층, 또는 강자성체 입자의 내부 도핑이나 표면장식 등의 연구 결과가 강자성체를 활용한 임계전류밀도의 향상이 가능함을 나타내고 있다[8, 13-15]. 현재는 REBCO 초전도체와 동일하게 페로브스카이트 구조를 갖고 있으며 유사한 격자상수를 갖고있고 또한 높은 큐리 온도로 임계온도 이상에서 자성을 띠는 물질인 도핑된 LaMnO_3 물질을 이 많이 연구 되고 있다[10, 11, 16].

이 논문에서는 $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ (GdBCO)의 임계전류 밀도의 향상과 자기장 의존성을 개선하기 위한 연구로 강자성물질인 $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ (LSMO) 나노 입자를 표면 장식한 시료에서 GdBCO의 자속고정 특성을 살펴보았다. 이때 강자성체와 초전도체의 경계면 수십 nm 스케일에서 발생하는 근접효과에 의한 T_c 의 감소를 줄이고자 400 nm의 충분히 두꺼운 두께의 GdBCO를 사용하였으며 LSMO 입자들의 밀도를 체계적으로 달리하여 자속고정 특성의 변화에 대해 알아보았다. LSMO 입자가 첨가된 REBCO 박막에 대한 연구들은

* Corresponding author: bwkang@chungbuk.ac.kr

존재하지만 [8, 17] LSMO 입자를 이용한 자속고정 메커니즘에 대한 체계적인 연구 결과는 아직 발표되지 않았다.

2. 실험

LSMO 나노입자 표면 장식과 GdBCO 박막 제작은 SrTiO_3 (100) 단결정 기판위에 KrF 엑시머 레이저 ($\lambda = 248$)를 이용한 펄스 레이저 증착(pulsed laser deposition) 방법을 통해 이루어졌다. GdBCO 박막은 증착온도 750°C 에 300 mTorr의 산소 분위기에서 130mJ의 에너지로 400 nm 두께로 증착 후 500 Torr 산소 분위기 내에서 500°C 온도로 후열처리를 진행하였다. GdBCO를 증착하기 전에 표면 장식으로써 LSMO 입자의 경우 입자의 형태를 만들기 위해 증착온도는 450°C , 산소 분압 150 mTorr, 레이저 에너지 100 mJ의 조건으로 증착하였다. 이때 레이저의 펄스 수를 80, 160, 그리고 320으로 증가시켜 서로 다른 LSMO 입자 밀도를 갖는 시료를 각각 80p, 160p, 320p로 명명하였다.

STO 기판 위에 표면 장식한 LSMO 입자의 표면상태를 원자힘 현미경 (AFM, Bruker; XPS-100)을 이용하여 관측하였다. LSMO 입자 위에 GdBCO가 증착된 시료의 구조적 특성에 대한 분석은 X-선 회절 분석과 Extended X-ray absorption fine structure (EXAFS) 분광법을 통해 이루어졌다. 이때 EXAFS 스펙트럼은 포항 가속기 8C 빔 라인을 이용하여 Cu K-edge에서 측정하였다. 온도에 따른 저항 특성은 폐회로 냉각기 (closed cycle refrigerator)를 이용하여 사단자법 (four-probe method)으로 측정하였다. 자화 특성과 임계전류밀도 (J_c)는 MPMS (Quantum design magnetic property measurement system, XL-5)를 통해 측정되었으며 이때 J_c 는 Bean의 임계상태 모델 (critical state model) [18], $J_c = 20\Delta M/[a(1 - (a/3b))]$ 식을 통해 얻었다. 여기서 a 와 b 는 시료의 가로, 세로 길이 ($a < b$), ΔM 은 자화 차이를 의미한다.

3. 결과 및 토의

그림 1은 STO 위에 표면 장식으로 증착한 LSMO 나노입자들의 AFM 이미지이다. 80p, 160p, 그리고 320p 시료 모두 평균 크기 25 nm, 평균 높이 1 nm의 LSMO 입자가 균일한 형태로 분포되어 있으며 레이저 펄스 수가 증가할수록 LSMO의 입자의 개수 역시 증가하는 것을 볼 수 있다. LSMO 입자 밀도는 펄스가 증가할수록 각각 $84/\mu\text{m}^2$, $158/\mu\text{m}^2$, 그리고 $507/\mu\text{m}^2$ 로 비례하여 증가하였다. 모든 입자가 GdBCO 초전도 박막 내에 결함을 유도하여 하나의 자속고정중심 (pinning center)으로 작용한다고 가정할 때 예상되는 매칭 필드 (matching field)는 80p, 160p, 그리고 320p의 순서로 각각 0.2 T, 0.4 T, 그리고 1.1 T의 크기를 갖는다.

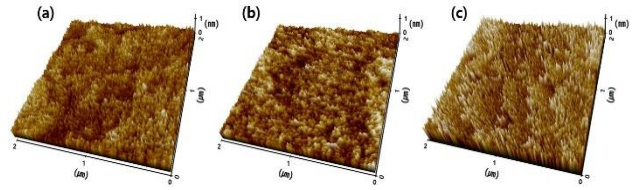


Fig. 1. 3D AFM images of LSMO particles deposited on STO substrates obtained by using (a) 80 pulses, (b) 160 pulses and (c) 320 pulses of laser.

STO 기판과 LSMO 입자들이 장식된 STO 기판 위에 GdBCO 박막을 각각 증착하고 온도에 따른 저항을 측정하여 LSMO 나노 입자가 임계온도에 어떠한 변화를 주는지 그림 2에 나타내었다. dR/dT 곡선에서 0으로 수렴하는 지점으로 구한 $T_{c,onset}$ 과 $T_{c,zero}$ 는 Pure 시료의 경우 각각 94 K과 91 K으로 가장 높게 나타났으며 LSMO 입자의 밀도가 증가할수록 임계온도가 감소하는 경향을 보였다. GdBCO 박막의 두께가 초전도/강자성체의 근접효과가 작용하는 범위로 알려진 ~ 10 nm [19]보다 훨씬 두꺼운 400 nm이므로 pair-breaking에 의한 초전도성 감소는 아닌 것으로 판단된다. 특히 $T_{c,zero}$ 부근에서 꼬리가 형성되는 것과 pure GdBCO에 비해 잔류저항비 (Residual resistance ratio, RRR)가 감소하는 것으로 보아 LSMO 나노입자로 인해 불균일한 초전도 영역의 생성에 의한 것으로 판단된다.

이 시료들의 자속고정 특성을 살펴보았다. 그림 3은 pure와 LSMO 나노입자 장식 시료의 77 K 자화로 부터 구한 임계전류밀도의 자기장 의존성을 나타낸 결과이다. Self-field를 포함한 모든 자기장 영역에서 LSMO 나노입자를 사용한 시료의 임계전류밀도가 향상되었으며 80p 시료가 가장 큰 임계전류밀도 값을 가지고 임계전류밀도 증가 폭은 펄스 수에 반비례 하였다. 임계전류밀도 뿐만 아니라 임계전류밀도의 자기장 의존성도 향상되어 임계전류밀도의 자기장 감소 비율을 나타내는 α 값의 경우 pure 시료에서는 $\alpha \sim 0.72$ 이었는데 LSMO 나노

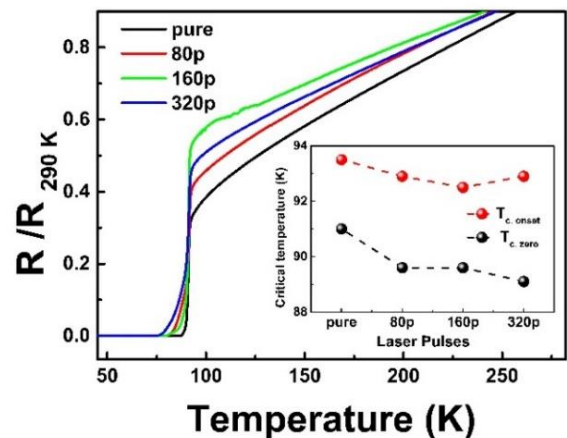


Fig. 1. Normalized resistance of GdBCO samples with LSMO particles as a function of temperature. Pure GdBCO data is also included for comparison. Inset: Onset and zero critical temperatures as a function of LSMO laser pulses.

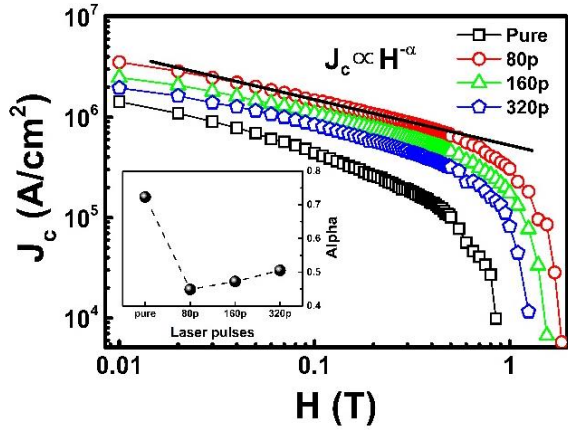


Fig. 3. Double-logarithmic graph of the field dependence of the critical current density of pure GdBCO and GdBCO films with LSMO particles Inset: The exponent α of power law decay as a function of LSMO laser pulses.

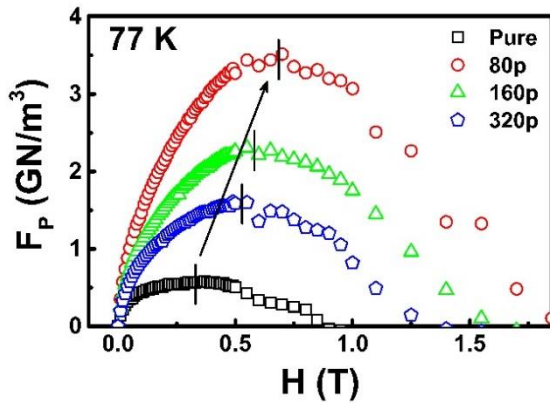


Fig. 4. Pinning force density of all samples as a function of magnetic field. The position of $F_{p,max}$ shifts to higher fields.

입자가 첨가되면 가파르게 감소하고 80p 시료에서 가장 작은 값 $\alpha \sim 0.45$ 을 가지는 것을 확인하였다. 이를 통해 표면 장식으로 첨가된 LSMO 나노 입자가 자속고정 중심으로 효과적으로 작용하고 있고 나노입자 첨가에 의해 자속고정 메커니즘이 변하는 것을 알 수 있다. 하지만 LSMO 시료의 임계전류밀도가 증가하는 자기장의 영역은 각각의 입자의 밀도를 이용하여 예상한 매칭필드의 경향과는 전혀 다르게 모든 자기장 영역에서 나타난다. 이는 나노 입자가 표면 장식에 의한 효과로 자속고정에 기여 하는 것 이외에 다른 영향이 존재한다는 것을 의미한다.

그림 4는 그림 3에서 얻은 임계전류밀도를 이용하여 $F_p = J_c \times \mu_0 H$ 의 식을 통해 계산한 자속고정힘 밀도 (pinning force density)의 자기장 의존성을 나타낸 그림이다. 임계전류밀도의 경향성에서 예상하는 것과 같이 80p 시료가 가장 큰 자속고정힘 밀도를 갖는 것을 볼 수 있다. 주목할 것은 최대 자속고정힘 밀도 $F_{p,max}$ 값을 갖는 자기장이 pure, 320p, 160p, 80p 순으로 증가하는 것이다. 이는 이러한 순서로 자속고정이 효과적으로 이루어지고 있음을 나타낸다.

나노입자의 밀도가 훨씬 작은 80p 시료가 320p 시료에 비해 우월한 자속고정 특성을 가지는 이유를 확인하기 위하여 LSMO 나노 입자 장식에 의한 GdBCO 초전도체의 구조적 변화를 연구하고자 XRD를 측정 분석하였다. Pure GdBCO를 포함 LSMO 나노입자의 모든 시료가 잘 정의된 (00 l) peak들을 나타내는 것으로 보아 c -축 성장이 잘 유지되는 것을 확인하였다. 특이한 점은 각 피크에서의 반치폭 (full width half maximum, β) 값에 차이가 존재하는 것이다. Williamson-Hall 해석[20]에 따르면 이는 GdBCO 내에 작용하는 변형 (strain)이 다르게 작용하고 있음을 의미한다. 그림 5는 LSMO 나노 입자들에 의해 변화한 GdBCO내의 변형을 측정하고자 Williamson-Hall 방정식 $\beta^2 \cos^2 \theta = 16\epsilon^2 \sin^2 \theta$, 여기서 ϵ 은 strain, 을 나타낸 것이며 기울기 값이 내부 변형 (internal strain)을 나타낸다. 선형 피팅을 통해 구한 기울기로부터 80p 시료의 경우 pure 보다 오히려 작은 변형을 갖지만 펄스 수가 증가 할수록 더 큰 내부 변형이 작용하는 것을 그림 5의 속그림에서 알 수 있다. LSMO 입자 밀도에 의해서 GdBCO가 겪는 변형이 달라지는 것은 흥미로운 결과이다. 하지만 Williamson-Hall 기술은 반 정량적이며 비대칭 회절선을 이용할 수 없기 때문에 일반적으로 이방성 변형된 샘플의 변형상태가 인장 변형인지 압축변형인지 알 수 없고 변형의 크기만을 알 수 있다. 따라서 어떤 변형인지, 그리고 해당 변형이 GdBCO 초전도체의 국부 구조 (local structure) 어떠한 영향을 주는지 알아보기 위해 EXAFS 측정과 분석을 진행 하였다. 그림 6는 pure GdBCO 와 LSMO 입자 시료의 Cu K-edge에서 EXAFS 스펙트럼 측정결과를 푸리에 변환하여 실공간 (real space)으로 표현한 그래프이다. 그래프에서 첫 번째 꺾질은 Cu-O 결합길이의 기여에 해당되며, 이는 LSMO 입자 밀도에 따라 조금씩 변화한다는 것을 알 수 있다. 그림 7은 EXAFS 데이터의 1st-shell 피팅 [21]을 통해서 구한 각 시료의 Cu-O 결합길이를 나타내는데 LSMO 입자의 밀도가 커질수록 결합길이가 감소하는 경향을 보인다. 이것을 그림 5의 내부변형 결과와 비교해보면 내부변형과 결합길이가 서로 반대 경향을 보이는 것을 통해서

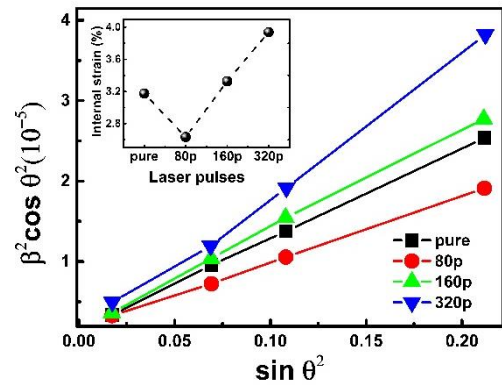


Fig. 5. Williamson-Hall plot at XRD (00 l) peaks of pure GdBCO and GdBCO with LSMO particles. Inset: Internal strain as a function of LSMO laser pulses.

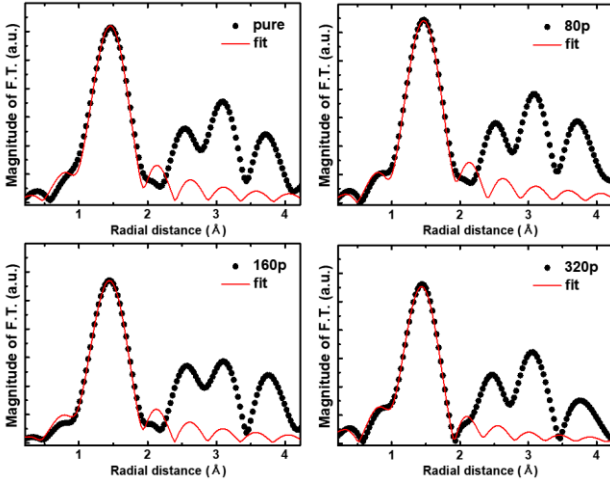


Fig. 6. Fourier transform of Cu K-edge EXAFS signal of pure GdBCO film and GdBCO films with LSMO particles. Red lines are the results of one shell fitting for the Cu-O bond.

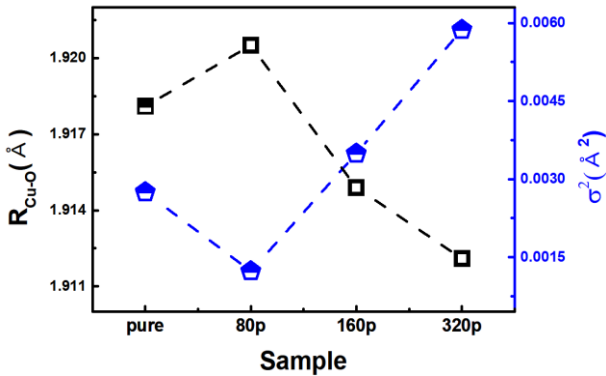


Fig. 7. Cu-O bond length and Debye-Waller factor as a function of LSMO laser pulses.

LSMO 입자 첨가에 의해 GdBCO 시료가 받는 변형이 압축변형임을 알 수 있다. Pure 시료의 경우 GdBCO의 격자 상수는 $a = 3.83 \text{ \AA}$, $b = 3.89 \text{ \AA}$ 이고 STO의 격자 상수가 3.905 \AA 로 더 크기 때문에 in-plane 기준에서 바깥쪽 방향의 힘을 받고 성장한다. 하지만 LSMO 나노입자로 표면 장식이 될 경우 GdBCO 층이 성장하는 과정에서 결합이 발생하고 그만큼의 압축변형을 받는다. 따라서 80p 시료에서는 STO에 의한 인장변형과 나노입자에 의해서 발생한 압축변형의 합으로 오히려 pure 보다 낮은 변형을 갖지만 LSMO 나노입자의 밀도가 증가할수록 점차 압축변형이 주를 이루어 결합길이 감소와 변형의 증가가 이루어 지는 것으로 판단된다. Cu-O 결합길이 외에 EXAFS 분석으로부터 알 수 있는 다른 정보는 결합길이의 평균제곱요동 (mean-square fluctuation) 을 나타내는 Debye-Waller factor (σ^2) 이다[22]. Debye-Waller factor는 결합의 국소적 무질서와 관계가 있기 때문에 이 값이 클수록 Cu-O 결합의 무질서가 증가함을 나타낸다. 그림 7에 나타난 것처럼 Debye-Waller factor는 Cu-O 결합 길이와 반비례 관계를 보이며 80p 시료의 경우 pure보다 더 작은 무질서도를 갖다가 LSMO 나노입자의 밀도가

증가할 수록 Cu-O 결합의 무질서도가 증가하는 것을 확인 하였다. 이것은 R-T 데이터에서 확인한 바와 같이 LSMO 입자 밀도 증가에 따라 불균일한 초전도 영역이 증가하는 것과 일치하는 결과이다. 이로부터 LSMO 나노입자의 밀도가 증가하면 작용 가능한 자속고정 중심의 수는 증가하지만 나노입자로 인해 GdBCO 초전도체 내부에 발생하는 변형도 증가하여 무질서도를 증가시키기 때문에 불균일한 초전도 영역이 증가하여 자속고정 효과가 감소하는 것으로 판단된다.

4. 결론

강자성 물질인 LSMO 나노 입자의 밀도를 레이저의 펄스 수 조절로 변화시켜 표면 장식한 기판 위에 증착한 GdBCO 박막의 자속고정 특성을 연구하였다. LSMO 나노 입자가 표면 장식된 모든 시료의 임계전류밀도가 pure GdBCO 에 비해 증가하였으며 임계전류밀도의 자기장 의존성도 향상되었다. 하지만 흥미롭게도 임계전류밀도의 증가 폭이나 최대 자속고정힘의 위치의 변화는 LSMO 나노입자의 밀도에 반비례하는 것으로 관측되었다. XRD 측정의 반치폭 분석과 EXAFS 분광학을 통한 미세구조 분석 결과 LSMO 입자의 첨가에 의해 GdBCO 초전도체의 Cu-O 결합이 받는 변형은 압축변형이며 밀도가 증가할 수록 압축변형의 크기가 증가하여 Cu-O 결합에 무질서도를 가중시키는 것을 확인하였다. 이로 인해 자속고정 중심의 증가에도 불구하고 자속고정 능력은 감소하는 것으로 판단된다. 따라서 GdBCO 층의 내부 변형을 최소화 할 수 있도록 강자성체 입자를 적절한 밀도로 표면장식한다면 더욱 향상된 자속고정 특성을 나타낼 수 있을 것으로 예상된다.

ACKNOWLEDGMENTS

This work was supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korean government (MSIT) (NRF-2018R1A2B6004784).

REFERENCES

- [1] A. Bianconi, G. Bianconi, D. Di Castro, H. Oyanagi, and N. L. Saini, "The stripe critical point for cuprates," *J. Phys.: Condens. Matter*, vol. 12, pp. 10655, 2000.
- [2] N. L. Saini, H. Oyanagi, Z. Wu, and A. Bianconi, "Lattice fluctuations and inhomogeneous charge states of high- T_c superconductors," *Supercond. Sci. Technol.*, vol. 15, pp. 439, 2002.
- [3] T. Horide, K. Taguchi, K. Matsumoto, N. Matsukida, M. Ishimaru, P. Mele, and R. Kita, "Influence of matching field on critical current density and irreversibility temperature in $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ films with BaMO_3 ($M = \text{Zr, Sn, Hf}$) nanorods," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 108, pp. 082601, 2016.
- [4] T. Horide, N. Matsukida, M. Ishimaru, R. Kita, S. awaji, and K. Matsumoto, "Pin potential effect on vortex pinning in $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ films containing nanorods: Pin size effect and mixed pinning," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 110, pp. 052601, 2017.
- [5] P. Mele, K. Matsumoto, T. Horide, A. Ichinose, M. Mukaida, Y. Yoshida, S. Horri, and R. Kita, "Ultra-high flux pinning properties of BaMO_3 -doped $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ thin films ($M = \text{Zr, Sn}$)," *Supercond. Sci. Technol.*, vol. 21, pp. 032002, 2008.

- [6] L. Civale, A. D. Marwick, T. K. Worthington, M. A. Kirk, J. R. Thompson, L. Krusin-Elbaum, Y. Sun, J. R. Clem, and F. Holtzberg, "Vortex confinement by columnar defects in $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ crystals: Enhanced pinning at high fields and temperatures," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 67, pp. 648, 1991.
- [7] R. Weinstein, R. -P. Sawh, A. Gandini, and D. Parks, "Improved pinning by multiple in-line damage," *Supercond. Sci. Technol.*, vol. 18, pp. 2, 2005.
- [8] Y. Wang, Y. Li, L. Liu, and D. Xu, "Improvement of flux pinning in $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7.6}$ thin film by nanoscale ferromagnetic $\text{La}_{0.67}\text{Sr}_{0.33}\text{MnO}_3$ pretreatment of substrate surface," *Ceram. Int.*, vol. 44, pp. 225, 2018.
- [9] T. Aytug, M. Paranthaman, K. J. Leonard, S. Kang, P. M. Martin, L. Heatherly, A. Goyal, A. O. Ijaduola, J. R. Thompson, D. K. Christen, R. Meng, I. Rusakova, and C. W. Chu, "Analysis of flux pinning in $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7.8}$ films by nanoparticle-modified substrate surfaces," *Phys. Rev. B*, vol. 74, pp. 184505, 2006.
- [10] J. G. Lin, S. L. Cheng, C. R. Chang, and D. Y. Xing, "Superconducting and transport properties of $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7/\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ bilayers," *J. Appl. Phys.*, vol. 98, pp. 023910, 2005.
- [11] P. Przyslupski, I. Komissarov, W. Paszkowicz, P. Dlugowski, R. Minikayev, and M. Sawicki, "Magnetic properties of $\text{La}_{0.67}\text{Sr}_{0.33}\text{MnO}_3/\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ superlattice," *Phys. Rev. B*, vol. 69, pp. 134428, 2004.
- [12] L. N. Bulaevskii, E. M. Chudnovsky, and M. P. Maley, "Magnetic pinning in superconductor-ferromagnetic multilayers," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 76, pp. 18, 2000.
- [13] A. K. Jha, N. Khare, and R. Pinto, "Interface engineering using ferromagnetic nanoparticles for enhancing pinning in $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ thin film," *J. Appl. Phys.*, vol. 110, pp. 113920, 2011.
- [14] C. Z. Chen, Z. Y. Liu, L. Zeng, C. B. Cai, R. Zeng, and S. X. Dou, "Robust high temperature magnetic pinning induced by proximity in $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7.8}/\text{La}_{0.67}\text{Sr}_{0.33}\text{MnO}_3$ hybrids," *J. Appl. Phys.*, vol. 109, pp. 073921, 2011.
- [15] J. Huang and H. Wang, "Effective Magnetic Pinning Schemes for Enhanced Superconducting Property in High Temperature Superconductor $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$: A Review," *Supercond. Sci. Tech.*, vol. 30, pp. 11, 2017.
- [16] J. Soltan, J. Albrecht, and H. U. Habermeier, "Ferromagnetic/superconducting bilayer structure: A model system for spin diffusion length estimation," *Phys. Rev. B*, vol. 70, pp. 144517, 2004.
- [17] Alok K. Jha, Neeraj Khare, and R. Pinto, "Influence of Interfacial LSMO Nanoparticles/Layer on the Vortex Pinning Properties of YBCO Thin Film," *J. Supercond. Nov. Magn.*, vol. 27, pp. 1021, 2014.
- [18] C. V. Varanasi, J. Burke, H. Wang, J. H. Lee, and P. N. Barnes, "Thick $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}+\text{BaSnO}_3$ films with enhanced critical current density at high magnetic fields," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 93, pp. 092501, 2008.
- [19] V. Pena, C. Visani, J. Garcia-Barriocanal, D. Arias, Z. Sefrioui, C. Leon, J. Santamaria, and Carmen A. Almasan, "Spin diffusion versus proximity effect at ferromagnet / superconductor $\text{La}_{0.7}\text{Ca}_{0.3}\text{MnO}_3/\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7.8}$ interfaces," *Phys. Rev. B*, vol. 73, pp. 104513, 2006.
- [20] A. Llordes, A. Palau, J. Gazquez, M. Coll, R. Vlad, A. Pomar, J. Arbiol, R. Guzman, S. Ye, V. Rouco, F. Sandiumenge, S. Ricart, T. Puig, M. Varela, D. Chateigner, J. Vanacken, J. Gutierrez, V. Moshchalkov, G. Deutscher, C. Magen, and X. obradors, "Nanoscale strain-induced pair suppression as a vortex-pinning mechanism in high-temperature superconductors," *Nature Mat.*, vol. 11, pp. 329, 2012.
- [21] J. Y. Oh, Tien M. Le, A. T. Pham, D. H. Tran, D. S. Yang, and B. Kang, "Role of interlayer coupling in alkaline-substituted (Bi, Pb)-2223 superconductors," *J. Alloy. Compd.*, vol. 804, pp. 348, 2019.
- [22] R. Prins and D. C. Koningsberger, X-ray Absorption: Principles, Applications, Techniques of EXAFS, SEXAFS, XANES, Wiley, New York, 1988.