

Structural suitability of GdFeO₃ as a magnetic buffer layer for GdBa₂Cu₃O_{7-x} superconducting thin films

H. S. Park^a, J. Y. Oh^a, B. H. Song^a, and B. Kang^{a,*}

^a Department of Physics, Chungbuk National University, Cheongju 28644, Korea

(Received 24 May 2021; revised or reviewed 2 June 2021; accepted 3 June 2021)

Abstract

We investigated the structural suitability of GdFeO₃ (GdFO) as a buffer layer for the GdBa₂Cu₃O_{7-x} (GdBCO) superconducting films. GdFO films with different thicknesses and GdBCO thin films were all prepared by using a pulsed laser deposition technique. The analyses of X-ray diffraction and EXAFS data indicates that the *c*-axis parameter increases and the Fe-O bond length decreases with the GdFO thickness due to the compressive stain induced by the lattice mismatch between GdFO and STO substrate and as a result, the Debye-Waller factor, an index of disorder in the local structure near the Fe-O bond, increases with the GdFO thickness. However, for the GdBCO/GdFO bilayer structure, the Debye-Waller factor decreases as the GdFO thickness increases indicating a diminished disorder by the structural coupling between GdFO and GdBCO. These results indicate that an appropriate thickness of GdFO is required to be utilized as a magnetic buffer layer for the GdBCO superconducting films.

Keywords: GdBCO, GdFeO₃, magnetic buffer layer, EXAFS

1. 서 론

고온 초전도체 중 하나인 REBCO(REBa₂Cu₃O_{7-x}, RE: rare-earth element)는 액체 질소 온도(77 K) 이상의 높은 임계온도(T_c), 큰 값의 임계 전류 밀도(J_c)와 비가역 자기장(irreversibility field, H_{irr})으로 인해 전력 분야로의 응용이 유망한 물질이다[1, 2].

REBCO 초전도체의 전력 분야 실제 적용에 대한 핵심 문제는 초전도체 내부의 자기 소용돌이 (magnetic flux)와 자속 고정 중심(flux pinning center) 간의 상호작용에 전적으로 의존하는 J_c 를 개선하는 방법이다. 자기 소용돌이의 움직임은 J_c 를 감소시키는 중요한 메커니즘이며, 자기소용돌이의 움직임을 제어하는 한 가지 방법은 자속 고정 중심에 고정하는 것이다. 일반적으로 REBCO 고온 초전도체의 경우는 박막 형태로 증착 시 낱알 경계(grain boundary)나 산소의 빈자리(oxygen vacancy)와 같은 점 결함이 임의적으로 분포하여 자속 고정 중심으로서의 역할을 하게 되지만, 그 밀도가 충분하지 않아 큰 자기장 하에서 높은 J_c 를 유지하는데 한계가 있다.

이를 극복하기 위한 초기 단계의 연구에서는 초전도체 내부에 인위적으로 나노 미터 크기의 결함을 생성하여 자속 고정 중심의 역할을 할 수 있는 공정을 모색하는 연구가 진행되었다. 그 결과 인위적인 자속 고정 환경을 통해 전체 자기장 영역에서 J_c 값이 크게 향상되었지만, 온도가 임계온도 근처로 가까워짐에 따라 최대 자속 고정 에너지의 감소와 비초전도 영역의 생성으로 인한 T_c 의 감소라는 단점을 보여주었다[3-9].

최근 연구에서는 이와 같은 한계를 극복할 수 있는 대안으로 자기 자속 고정(magnetic pinning)을 제안하고 있다. Bulaevskii *et al.* 은 강자성체-초전도체 다층 구조에서 강자성층 내의 줄무늬 자구 구조(magnetic domain)가 초전도층의 와류와 Zeeman 상호작용을 통해 큐리 온도 (T_{curie})

이하에서 주기적이고 온도에 의존하지 않는 자속 고정 전위를 생성한다고 제안하였다[10]. 최근 이와 관련하여 초전도성 향상에 관한 많은 연구들이 진행되고 있으며, 실제로 강자성체-초전도체의 다층, 이중층 혹은 강자성체 입자의 첨가 등 다양한 접근 방식을 통해 자속 고정의 향상이 이루어졌다[8, 11-13].

이전의 연구들은 대부분 REBCO와 상대적으로 우수한 구조적 호환성을 가진 반금속성 강자성체인 La_{0.7}Sr_{0.3}MnO₃(LSMO)와의 다층 혹은 이중층에서의 초전도 특성에 주목하였다. LaMnO₃(LMO)의 Mn 자리에 Sr을 치환한 LSMO와 REBCO 초전도체 접합에서는 근접 효과(proximity effect)[14]가 초전도 간섭성 길이(coherence length)와 스핀 확산 길이와 같은 특성 길이 척도에 따라 좌우되며, 강자성체의 자기 상과 입자 배향 그리고 초전도체와의 구조적 호환성에 매우 의존적임을 보여주었다. 특히, LSMO는 내부의 MnO₆ 팔면체의 왜곡으로 인해 분극이 발생하는 강유전체이며, 이는 자기 구조의 불안정성을 촉진시켜 임계온도 근처에서 반강자성 상의 출현과 같은 다양한 자기 위상을 갖도록 한다. 이로 인해 강자성체에 의한 자기 자속 고정을 구현하는데 있어서 그 메커니즘이 다소 복잡한 것으로 알려져 있다[8, 15].

이에 반해 LMO와 동일한 구조를 갖는 오소페라이트(orthoferrite) REFeO₃는 Mn³⁺ 이온 대신에 Fe³⁺ 이온을 가진 물질로, 구조적으로 LMO의 동질이상물질 형태로 준 안정적이며 강유전성 거동을 나타내는 것으로 보고되었다. 흥미롭게도 LSMO보다 큐리 온도는 2배 낮지만 2배 큰 자기 분극 값을 가지는 물질이며, 이는 REFeO₃의 자기 자속 고정 중심으로서의 가능성을 보여준다[16-18]. Wimbush *et al.* 은 YBa₂Cu₃O_{7-x} (YBCO)에 2차상 형태의 YFeO₃(YFO)를 첨가하여 적은 양의 YFO 농도에서 T_c 의 감소 없이 J_c 가 향상됨을 보고하였다 [19]. 하지만, 2차상 형태의 첨가에서 드러나는 poisoning effect에 의한 초전도성의 감소와 2차상의 임의적 분포에 따른 재현성의 부재는 여전히 해결해야 할 과제로 남아있으며, 현재까지 많은 연구가 되어

* Corresponding author: bwkang@chungbuk.ac.kr

있지 않은 실정이다.

우리는 2차상 형태의 첨가가 아닌 $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ (GdBCO) 초전도체와 오소페라이트의 이중층 구조에서 구조적 결합과 관련한 초전도 특성의 변화를 조사하였다. 이번 연구에서 사용된 GdFeO_3 (GdFO)는 $a = 5.36 \text{ \AA}$, $b = 5.62 \text{ \AA}$, $c = 7.68 \text{ \AA}$ 의 격자 상수를 갖는다. 기판으로 사용한 SrTiO_3 (STO)의 격자 상수 $a = 3.905 \text{ \AA}$ 에 비해 GdFO의 a, b 축 격자 상수가 약 $\sqrt{2}$ 배 정도 길어서 평면내에서(in-plane) 약 45° 돌아간 상태로 증착되는 특성을 확인한 연구가 보고되었다[20]. 본 연구는 자기 자속 콧음으로써 GdFO의 활용 가능성을 확인하기 위한 선형 실험으로 2차상 형태의 첨가에서 단점으로 지적되었던 부분들을 극복할 수 있는지 여부에 대한 정보를 제공할 수 있을 것이다.

2. 실험

GdFO와 GdBCO 층은 $\text{SrTiO}_3(001)$ 단결정 기판 위에 excimer laser (KrF, $\lambda = 248 \text{ nm}$)를 이용하여 기판 온도 750°C , 산소 분압 각각 250 mTorr, 300 mTorr에서 증착되었다. 레이저 에너지 밀도는 2 J/cm^2 이고 레이저 반복 주기는 8Hz를 사용하여 GdFO는 각각 1600, 3200, 6400 pulses, 그리고 GdBCO는 3120 pulse로 증착하였다. 단면 SEM (cross-sectional SEM)을 통해 확인한 GdFO 박막의 두께는 각각 20, 40, 80 nm, GdBCO는 200 nm이다.

제작된 시료의 X-ray θ - 2θ 구조 특성 측정은 $\text{Cu-K}\alpha$ radiation과 HyPix-3000 detector를 갖춘 Rigaku X-ray Diffractometer를 사용하여 진행되었다. GdBCO 박막의 격자 이완을 조사하기 위해 라만 분광계 (XperRam200Vn, Nanobase)를 사용한 라만 산란 측정을 하였으며, 후방 산란 기하학에서 수집된 스펙트럼은 샘플 표면에서 대략 2mW의 레이저 출력을 가진 녹색 DPSS 레이저의 532 nm 방출선을 사용하여 측정하였다.

국소 구조 분석은 포항 가속기연구소 (Pohang Light Source, PLS)의 8C(Nano XAFS) 빔 라인을 이용하여 Fe K-edge와 Cu K-edge에서의 EXAFS (Extended X-ray Absorption Fine Structure) 분광 측정을 통해 이루어졌다. 온도에 따른 저항 특성은 폐회로 냉각기 (closed cycle refrigerator)를 이용하여 사단자법 (four-probe method)으로 측정하였다.

3. 결과 및 토의

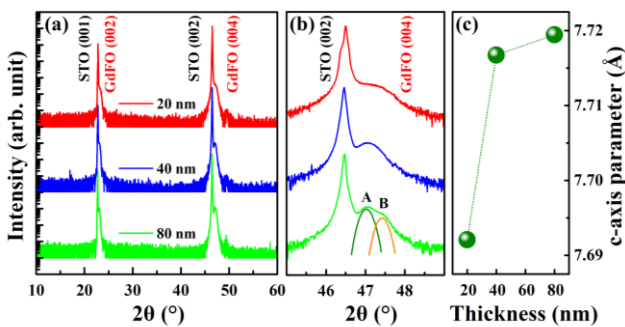


Fig. 1 (a), (b) XRD θ - 2θ scans of GdFO films grown on $\text{STO}(001)$ substrate (c) c-axis parameters calculated from the XRD data as a function of GdFO thickness.

GdFO는 $a = 5.36 \text{ \AA}$, $b = 5.62 \text{ \AA}$, $c = 7.68 \text{ \AA}$ 의 벌크 격자 상수 값을 갖고 있다. GdFO의 a, b 축 길이는 STO 기판 ($a = b = c =$

3.905 \AA)의 대각선 길이 ($\sqrt{2}a_{\text{STO}} \sim 5.52 \text{ \AA}$)와 유사한 값을 가지고 있다. 따라서 STO기판 위에서 성장하는 GdFO는 마름모형태로 성장을 할 가능성이 크다. 이때, GdFO가 STO기판보다 a 축 방향으로 약 0.16 \AA 짧아서 인장 변형 (tensile stress)을 받고, b 축 방향으로 약 0.10 \AA 길어서 압축 변형 (compressive stress)을 받으며 성장할 것으로 예상되고, b 축에 비해 a 축의 격자 차이가 크기 때문에 면내 방향의 변형은 인장 변형이 주는 영향이 클 것이다. 그림 1은 GdFO 박막의 θ - 2θ 스캔의 이미지이다. GdFO 박막의 두께에 따른 (002)와 (004) 피크의 변화에서 볼 수 있듯이 STO와 GdFO의 격자 불일치에 의해 유도된 변형이 GdFO의 전체적인 구조를 변형시키고 있음을 확인할 수 있다. 특히 GdFO의 두께가 증가함에 따라서 c 축으로 급격한 인장이 나타난다(그림 1(c)). GdFO의 두께가 두꺼워지면 기판으로부터 받는 변형이 풀리게 되는데 a 축의 격자 차이가 b 축보다 커서 압축 변형이 줄어드는 정도에 비해 인장 변형이 상대적으로 급격하게 줄어들 것이고, 이는 GdFO 박막의 c 축 방향으로의 인장을 야기하게 된다. 또한 인장 변형이 풀리는 정도가 상대적으로 급격하여 압축 변형과의 비율이 비슷해짐으로 인해 GdFO 박막의 두께가 증가할수록 c 축 길이가 포화(saturation)되는 모습을 확인할 수 있다. 흥미롭게도 80 nm 두께의 GdFO 박막에서는 20 nm와 40 nm에서 관찰되지 않았던 GdFO (004) 피크의 갈라짐이 관찰되었다. GdFO (004)에 대한 Gaussian

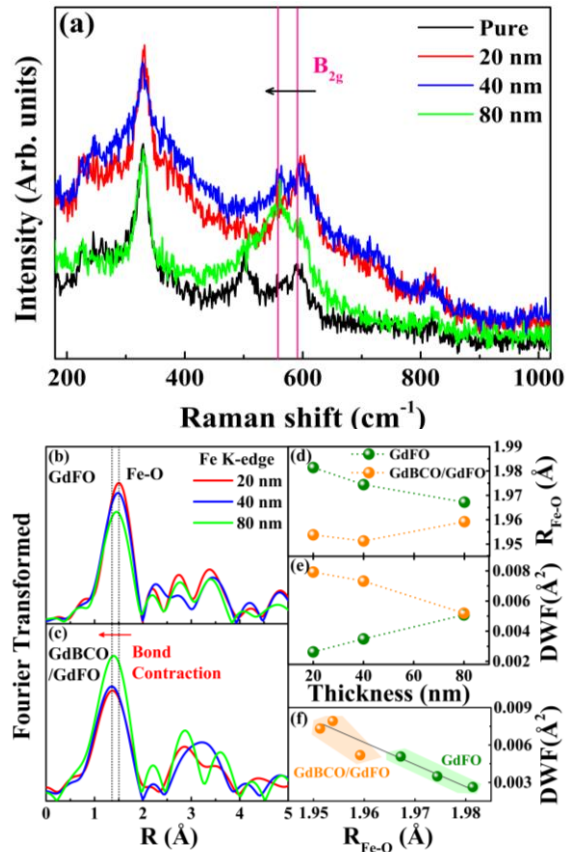


Fig. 2. (a) The room temperature Raman spectra of the GdBCO single layer (SL) and GdBCO/GdFO bilayer (BL) films deposited on STO substrate with different GdFO thicknesses. Fourier transform of the Fe K-edge EXAFS spectra for (b) GdFO SL and (c) GdFO/GdBCO BL. GdFO thickness dependence of (d) Fe-O bond length and (e) Debye-Waller Factor (DWF) determined by EXAFS model fits (f) DWF as a function of Fe-O bond length.

함수 피팅은 80 nm 시료에서 A와 B의 두 가지 피크를 가지고 있음을 보여주는데 이는 서로 다른 구조를 공유하고 있음을 의미한다. 일반적으로 ABO₃ 페로브 스키이트는 박막으로 증착이 될 때 기판과의 격자 불일치로 인해 변형력을 받아 성장 중에 BO₆ 팔면체의 회전을 통한 구조적 왜곡이 나타난다. 80 nm 두께의 시료에서 나타난 이러한 특징은 다른 시료보다 더욱 왜곡되고 회전된 FeO₆ 구조를 가지고 있으며 동시에 STO 기판과 GdFO 사이의 평면내 변형력이 GdFO의 두께가 증가함에 따라 더욱 크게 영향을 미침을 의미한다.

GdFO의 서로 다른 성장 메커니즘이 GdBCO/GdFO 이중층 시스템에서 GdBCO와 어떠한 구조적 결합을 가지고 있는지를 확인하기 위하여 Raman 산란 측정을 하였다. 그림 2(a)는 GdBCO/GdFO 이중층 시스템에서의 Raman 피크 및 진동 모드를 나타낸다. 변형에 의한 격자 왜곡은 라만 피크의 이동에 영향을 미칠 수 있으며 BO₆ 구조를 공유하는 물질의 경우, Jahn-Teller 왜곡을 반영하는 590 cm⁻¹ 주위에 나타나는 B_{2g} 뺨침 모드 (stretching mode)의 이동으로 특성화 된다. 그림 2(a)에서 볼 수 있듯이 GdFO 두께 증가에 따라 B_{2g} 모드의 뚜렷한 이동이 관찰되는데, 이는 두께가 두꺼워질수록 FeO₆ 팔면체 내에서 Fe-O 사이의 결합 길이 (bond-length)의 변화가 두드러짐을 의미한다. XRD 결과와 연관 시켜보면 STO와 GdFO의 격자 상수 차이로 인한 압축 변형의 정도가 첫번째 구간 (20 nm와 40 nm)과 두번째 구간 (80 nm) 사이에서 차이가 나는 것을 알 수 있다. 이러한 관찰은 GdFO의 두께에 따른 서로 다른 성장 메커니즘이 위에 GdBCO를 증착한 후에도 여전히 유효하다는 것을 의미한다.

GdFO의 성장 메커니즘이 GdBCO 초전도체의 성장에 어떠한 영향을 미치는 지에 연구하기 위해 GdFO와 GdBCO의 국부 구조에 대한 분석을 진행하였다. 그림 2(b)와 (c)는 원자의 분포를 흡수 원자로부터 거리에 따라 나타낸 것으로 Fe K-edge에서 측정된 EXAFS 스펙트럼이다. 1.5 Å 부근에서 관찰되는 첫 번째 피크는 최 인접원자인 산소에 대한 정보로, Fe-O 결합길이의 분포를 나타낸다. 모든 시료에 대한 Fe-O결합의 정보를 구체화하기 위해 EXAFS 방정식에 기초하여 첫 번째 피크에 대한 피팅을 진행하였고[21], 그 결과를 GdFO 박막의 두께에 대한 함수로 그림 2(d)와 (e)에 나타내었다[22].

그림 2(d)에 나타난 바와 같이 GdFO 시료의 Fe-O 결합의 길이는 두께가 증가함에 따라 감소하였다. 이는 앞서 예상했던 것처럼 GdFO의 두께가 증가함에 따라 인장 변형이 풀리는 정도가 상대적으로 급격하여 Fe-O 결합 길이가 축소된 것으로 이해된다. 반면, GdBCO/GdFO 구조의 Fe-O 결합에서는 상반된 거동을 관찰할 수 있다. 먼저 전체적인 Fe-O 결합의 길이는 상부 GdBCO층을 증착함에 따라 눈에 띄게 짧아지게 된다. GdBCO와 GdFO의 격자 상수 차이에 의해 GdFO가 상부 GdBCO층으로부터 추가적인 압축력을 받는 것으로 이해할 수 있다. 하지만, GdFO의 두께가 증가함에 따라 강한 압축력에 의해 감소하던 Fe-O 결합이 상부에 GdBCO가 있는 경우 GdFO의 두께 증가에 따라 증가하는 경향을 보이는 것은, 이중층 구조에서의 메커니즘은 단순히 GdFO의 변화에 의한 것이 아니라 GdBCO와의 구조적 결합을 고려해야 한다는 것을 시사한다.

이러한 GdBCO와 GdFO의 구조 결합은 구조적 왜곡과 상관관계가 있는 Debye-Waller 인자 (DWF)를 통해 더욱 명확하게 이해할 수 있다. 그림 2(f)는 GdFO에서 Fe-O 결합에 대한 DWF의 함수를 나타낸 것이다. Fe-O 결합의 무질서도는 길이가 감소함에 따라 커지는 것을 알 수 있는데, 강한 압축력으로 인해 줄어든 Fe-O 결합에 의해 구조의 무질서도가 증가한 것으로 이해된다. 이것은 구조적인

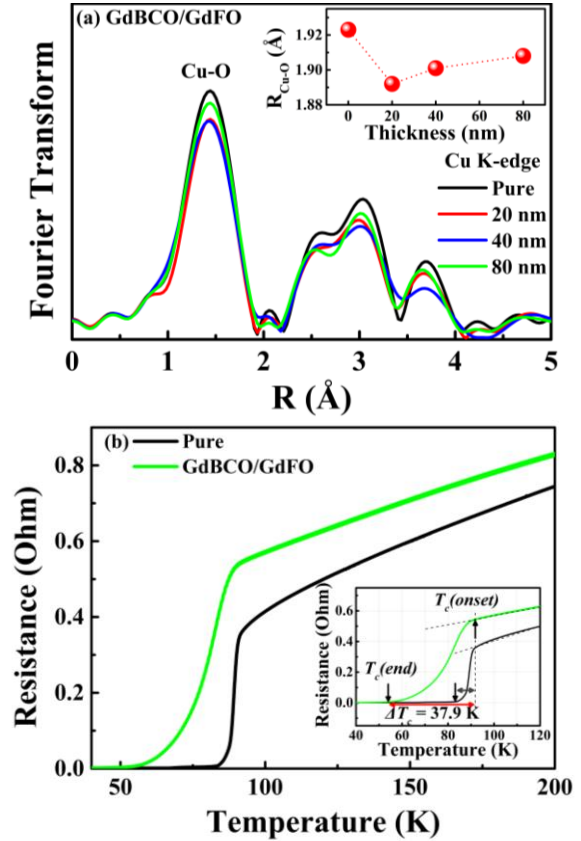


Fig. 3 (a) Fourier transform of the Cu K-edge EXAFS spectra for the GdBCO/GdFO films on STO substrate. Inset: The Cu-O bond distance as a function of GdFO thickness (b) Resistance of GdBCO/GdFO (80 nm) as a function of temperature. Pure GdBCO data are also included for comparison. Inset: Enlarged view near the superconducting transition.

불안정성을 의미하며 FeO₆ 팔면체의 회전으로 인해 두 가지 구조 상이 나타나는 XRD 결과를 뒷받침하는 결과이다. 반면 GdBCO를 상부 층으로 증착한 경우 무질서도도 반대된 경향성을 보이는데 이는 GdBCO와 GdFO의 구조적 결합으로 인해 GdFO의 두께가 증가할수록 구조적으로 안정한 상태로 변하는 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 GdBCO/GdFO 이중층 구조에서 GdBCO 층이 핵심적인 역할을 하고 있으며 이상적인 이중층 형성을 위해서는 두 층간 구조적인 결합 메커니즘을 명확히 이해하는 것이 중요하다는 점을 나타낸다.

GdBCO 구조에서 CuO₅ 피라미드는 GdFO 내의 FeO₆와 비슷한 구조를 가지므로 두 구조에서 평면 방향의 변화를 비교하면 두 층간 구조적인 결합 메커니즘을 이해하는데 도움이 될 것으로 생각된다. 그림 3(a)는 GdBCO/GdFO 구조에서 푸리에 변환된 Cu K-edge에서의 EXAFS 스펙트럼을 나타내고, 첫 번째 피크에 대응되는 CuO₅ 피라미드 내의 Cu-O 결합의 GdFO 두께에 따른 거동을 그림 3(a)의 속그림에 나타내었다. Cu-O 결합 길이는 pure 상태에서는 1.923 Å이지만 GdFO가 밀어 첨가된 경우 전체적으로 짧아지는 경향을 나타낸다. 여기서 주목할 점은 Cu-O 결합 길이가 GdFO의 두께가 증가함에 따라 pure 상태 길이로 회복이 되어 간다는 점이다. 이러한 Cu-O 결합의 거동은 그림 2(d)에서의 Fe-O 결합의 거동과 유사한데 GdBCO를 상부 층으로 증착한 GdFO에서 Fe-O 결합의 길이가 증가하는 근거가 GdBCO 내부의 구조적 변화와

강하게 연관이 있음을 보여준다. 또한 GdFO의 두께가 증가함에 따라 Cu-O 결합의 정보를 담고 있는 첫번째 피크의 세기가 증가하는 것을 확인할 수 있는데, 이것은 GdFO의 두께가 두꺼워질수록 GdBCO 내의 Cu-O 결합구조가 안정화되어가고 있음을 의미한다. 종합하면, GdBCO를 상부층으로 증착함에 따라 GdFO의 구조는 STO 기판뿐 아니라 GdBCO와 강한 구조적 결합을 가지게 되어 단층의 GdFO와는 전혀 다른 두께 의존성을 나타내게 된다. 일반적으로 GdBCO 시스템에서 Cu-O 결합 길이는 초전도 임계온도 (T_c)와 밀접한 관계를 가지고 있고, 불안정한 Cu-O 결합 상태는 CuO₂ 초전도 층으로의 전하 전송 (charge transfer)를 결정하는 가장 중요한 요소이다. 또한 지나친 압축 변형은 Cu 3d 와 O 2p 궤도 간의 혼성화를 감소시켜 초전도성의 감소를 야기시킨다[23]. 따라서 세 가지 샘플 중 Cu-O 결합의 거동이 가장 안정적인 구조를 가진 80 nm 두께의 GdFO 시료의 초전도 특성을 pure 시료와 비교하여 확인하였다. 그림 3(b)는 GdBCO/GdFO 와 pure GdBCO 시료의 온도에 따른 저항곡선이다. 임계 온도가 나타나기 시작하는 지점인 $T_c(\text{onset})$ 의 경우는 91.8 K 으로 두 시료에서 큰 차이를 나타내지 않는 것으로 관찰되었다. 하지만 초전도 전이폭 (ΔT_c)은 pure의 경우 8.7 K에서 이중층 구조의 경우 37.9 K로 크게 증가한 것을 확인할 수 있다. 또한 박막 내부의 불순물이나 구조적 결합 정도를 나타내는 지수인 RRR(Residual Resistivity Ratio, R_{92K}/R_{297K}) 값도 pure의 경우 2.786 에서 이중층 구조의 경우 1.838 로 감소하였다. 이는 불안정한 상태의 Cu-O 결합들에 기인한 것으로 보인다. 결과적으로 GdFO와의 구조적 결합을 위한 Cu-O 결합의 과도한 수축이 Cu와 O 원자의 정공(hole) 생성을 억제하고 비초전도 영역을 생성할 수 있어서 전체적인 초전도성을 저하시킨 것으로 이해된다. 그러나 GdFO와 GdBCO의 구조적 결합으로 인해 GdFO의 두께가 증가함에 따라 두 층 사이의 구조적인 변화를 최소화할 수 있다는 점은 눈 여겨 볼만한 사실이다. GdFO 층을 자기 자속뿔음을 위한 완충층으로 사용하기 위해서는 GdBCO 초전도체 내의 Cu-O 결합의 분포가 너무 불안정하지 않는 최적의 두께가 필수적인 요소이며, 현재 우리가 시도한 GdFO의 두께들은 최적의 두께가 아니라는 점을 알 수 있다. 따라서 GdFO의 완충층 활용을 위해 더 두꺼운 GdFO 박막을 완충층으로 한 이중층에 대한 후속 연구가 필요하다고 여겨진다.

4. 결 론

GdFO의 두께를 달리하여 STO 기판에 증착한 단층박막과 그 위에 GdBCO 박막을 증착한 이중층의 구조 특성과 그에 따른 초전도체의 임계온도에 대해 연구하였다. XRD 구조 분석에 의하면 GdFO 단층 박막의 두께가 20 nm, 40 nm 와는 달리 80 nm에서는 GdFO peak이 두개로 나뉘게 된다. 이로부터 두께가 두꺼워질수록 새로운 성장 메커니즘이 두드러진다는 점을 확인할 수 있었다. EXAFS data 분석을 통해 GdFO 단층 박막일 때 비해 GdBCO/GdFO 이중층 박막일 때 Fe-O의 결합 길이가 짧아지지만 GdFO가 80 nm 일 때 증가하는 모습을 볼 수 있다. Fe-O 결합의 구조적 안정 정도를 나타내는 DWF 분석으로부터 GdFO 단층은 두께가 두꺼워질수록 불안정성이 증가하고 그 위에 GdBCO를 증착하면 전체적으로 구조적 불안정성은 증가하게 되지만 GdFO가 두께가 증가하여 80 nm 일 때 상대적으로 안정성이 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이러한 구조적 불안정성의 영향으로 초전도 전이 구간이 넓어지게 됨을 확인하였고

GdBCO/GdFO 이중 구조의 안정성이 최적화될 수 있는 GdFO 두께에 대한 연구를 계획하고 있다.

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 YBa₂Cu₃O₇ films with BaMO₃ (M = 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 YBa₂Cu₃O_{7- δ} 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 BaMO₃-doped YBa₂Cu₃O_{7- δ} thin films (M = Zr, Sn)," *Supercond. Sci. Technol.*, vol. 21, pp. 032002, 2008.
- [6] L. Civalè, 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 YBa₂Cu₃O₇ 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 GdBa₂Cu₃O_{7- δ} thin film by nanoscale ferromagnetic La_{0.67}Sr_{0.33}MnO₃ 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. Ijoduola, J. R. Thompson, D. K. Christen, R. Meng, I. Rusakova, and C. W. Chu, "Analysis of flux pinning in YBa₂Cu₃O_{7- δ} films by nanoparticle-modified substrate surfaces," *Phys. Rev. B*, vol. 74, pp. 184505, 2006.
- [10] L. N. Bulaevskii, E. M. Chudnovsky, and M. P. Maley, "Magnetic pinning in superconductor-ferromagnetic multilayers," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 76, pp. 2594, 2000.
- [11] A. K. Jha, N. Khare, and R. Pinto, "Interface engineering using ferromagnetic nanoparticles for enhancing pinning in YBa₂Cu₃O₇ thin film," *J. Appl. Phys.*, vol. 110, pp. 113920, 2011.
- [12] 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 YBa₂Cu₃O_{7- δ} /La_{0.67}Sr_{0.33}MnO₃ hybrids," *J. Appl. Phys.*, vol. 109, pp. 073921, 2011.
- [13] J. Huang and H. Wang, "Effective Magnetic Pinning Schemes for Enhanced Superconducting Property in High Temperature Superconductor YBa₂Cu₃O_{7- δ} : A Review," *Supercond. Sci. Tech.*, vol. 30, pp. 114004, 2017.
- [14] 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 La_{0.7}Ca_{0.3}MnO₃/YBa₂Cu₃O_{7- δ} interfaces," *Phys. Rev. B*, vol. 73, pp. 104513, 2006.
- [15] 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.

- [16] J. G. Lin, S. L. Cheng, C. R. Chang, and D. Y. Xing, "Superconducting and transport properties of YBa₂Cu₃O₇ / La_{0.7}Sr_{0.3}MnO₃ bilayers," *J. Appl. Phys.*, vol. 98, pp. 023910, 2005.
- [17] P. Przyszlupski, I. Komissarov, W. Paszkowicz, P. Dluzewski, R. Minikayev, and M. Sawicki, "Magnetic properties of La_{0.67}Sr_{0.33}MnO₃/YBa₂Cu₃O₇ superlattice," *Phys. Rev. B*, vol. 69, pp. 134428, 2004.
- [18] S. 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.
- [19] S. C. Wimbush, J. H. Durrell, C. F. Tsai, H. Wang, Q. X. Jia, M. G. Blamire, and J. L. MacManus-Driscoll, "Enhanced critical current in YBa₂Cu₃O_{7-x} thin films through pinning by ferromagnetic YFeO₃ nanoparticles," *Supercond. Sci. Technol.*, vol. 23, pp. 045019, 2010.
- [20] A. Panchwatee, V. R. Reddy, A. Gupta, R. J. Choudhary, D. M. Phase, V. Ganesan, "Study of orthorhombic twins in epitaxial GdFeO₃ thin films." *Thin Solid Films*, vol. 669, pp. 301-305, 2019.
- [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, D. C. Koningsberger, X-ray Absorption: Principles, Applications, Techniques of EXAFS, SEXAFS, XANES, Wiley, New York, 1988.
- [23] J. Y. Oh, C. Y. Song, Y. J. Ko, D. S. Yang, B. Kang, "Strain-induced local structural change and its effect on the superconducting properties of GdBa₂Cu₃O_{7-x}/La_{0.7}Sr_{0.3}MnO₃ heterostructure." *Supercond. Sci. Technol.*, vol. 33, pp. 075002, 2020.