

A study on inhomogeneity of YBCO Coated Conductors using Low-temperature Scanning Laser Microscopy (LTSLM)

S. K. Park, J. M. Kim, S. B. Lee, S. H. Kim, G. Y. Kim, H. -C. Ri*

Department of Physics, Kyungpook National University, Daegu, Korea

(Received 20 August 2009; revised or reviewed 25 September 2009; accepted 28 September 2009)

저온 주사 레이저 현미경(LTSLM)을 이용한 YBCO 초전도 선재의 불균질성 연구

박상국, 김종만, 이상봉, 김상훈, 김가영, 이형철*

Abstract

Low temperature scanning laser microscopy (LTSLM) can be used for a two-dimensional display of bolometric response arising from the localized excitation of a sample by the focused laser beam. In this study, the distribution of critical temperature (T_c) and critical current density (J_c) in YBCO coated conductor were analyzed using LTSLM. For improving the temperature stability, we have modified the system into a double-shielding type. Through the modification, the temperature stability was successfully improved from ± 10 mK to ± 2 mK. The superconducting properties of YBCO coated conductors were measured for the sample of a narrow bridge type using wet etching process. The spatial non-uniformity of the ac voltage response, $\delta V(x)$, which is proportional to $\partial \rho(x, J_B) / \partial T$ in the transition temperature region could be observed and displayed in a two-dimensional image.

Keywords : LTSLM, YBCO, coated conductor, critical temperature, critical current density

I. Introduction

초전도 선재를 이용한 초전도 응용기기를 제작하려면 높은 임계온도를 가지며, 높은 외부 자기장 환경하에서도 높은 임계 전류 밀도를 가지는 물질과 구조로 제작하는 것이 유리하다. 이런 이유로 액체질소(LN₂)의 끓는점(77 K)보다

높은 임계온도를 가지는 YBa₂Cu₃O_{7- δ} 와 Bi₂Sr₂CaCu₂O_{8+x}를 이용한 초전도 선재의 개발이 중요한 연구 과제로 주목 받으며, 많은 연구가 진행되고 있다. 이 중 본 연구에 사용된 YBCO로 제작된 박막 선재는 c축의 방향에 따른 이방성 (anisotropy)이 작아서 고자기장 하에서 임계 전류 밀도가 BSCCO로 제작된 선재에 비해서 높다는 장점을 가지고 있다.

초전도 박막에 수직한 방향으로 자기장이 가해질 때의 자기이력손실을 줄이기 위해서는 초

*Corresponding author. Fax : +82 53 950 1739

e-mail : hcri@knu.ac.kr

전도 박막의 넓이를 줄여야 하기 때문에, YBCO 박막 선재를 평행하게 배열된 필라멘트 구조로 제작하는 것이 대안으로 제시되고 있다 [1-4]. 이와 같은 조건들을 충족시키기 위해 YBCO 초전도 선재 시료를 필라멘트 구조를 가지는 형태로 제작하였다.

높은 임계 전류 밀도는 대용량 초전도 기기에 적용되기 위한 필수조건이다. 그리고 고온 초전도체의 임계 전류 밀도가 물질의 미세구조에 의해 결정된다고 알려져 있다 [5-6]. 초전도 박막이나 선재 시료의 임계 온도와 임계 전류 밀도를 측정하기 위한 대부분의 실험들은 측정 결과가 시료 전체의 평균적인 값만을 나타낼 뿐 국소적인 부분에 대한 정보는 제공하지 못한다. 그러므로 임계 온도와 임계 전류 밀도의 공간적인 분포를 관찰할 수 있는 방법에 대한 연구가 매우 중요하다고 할 수 있다.

본 연구에서는 77 K 액체 질소 환경에서 초전도 박막 시료의 국소적인 특성을 관찰할 수 있는 저온 주사 레이저 현미경(Low temperature scanning laser microscopy, LTSLM)을 제작하여 초전도 선재의 임계 온도의 공간적 분포를 관찰하였다.

II. LTSLM의 원리

국소적 가열을 통한 초전도 박막의 임계온도와 임계전류의 공간적 분포를 분석하기 위한 저온 주사 레이저 현미경의 기본 요소와 원리를 Fig. 1에서 볼 수 있다 [7-15].

초전도 박막 시료의 온도를 임계 온도보다 조금 낮은 상태로 고정시켜둔 상태에서 시료 표면에 집광된 레이저 빔을 주사하면 주사된 지점에 국소적인 가열(local heating)이 일어나게 되고 온도 상승에 따른 저항의 증가가 생기게 되어 시료에 전류를 흘려줄 경우 전압 신호가 나타나게 되어 집광된 레이저 빔의 위치의 함수로 기록된다. 시료의 폭과 두께가 매우 작은 1차원의 경우, 국소적으로 가열된 시료 영역내의 온도에 따른 저항 변화가 일정하다고 가정하면 레이저 빔이 주사된 일정한 전류가 흐르는 시료의 전압 신호 $\delta V(x,t)$ 는 다음과 같이 주어진다 [16-17].

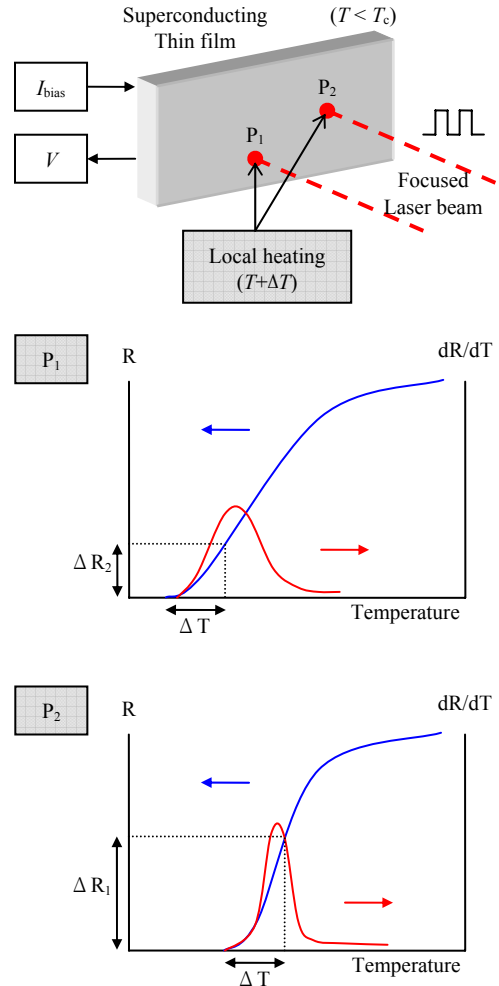


Fig. 1. Operating principle of the low temperature scanning laser microscopy (LTSLM). Two different points have different voltage signals.

$$\delta V(x,t) \cong J_B \frac{\partial \rho(x, J_B)}{\partial T} \Big|_{T=T_b} \Lambda \delta T_0(x,t) \quad (1)$$

여기서, J_B 는 전류밀도이고 $\rho(x, J_B)$ 는 국소적 저항이며 Λ 는 레이저 빔에 의해 국소적으로 가열되는 반경이고 $\delta T_0(x,t)$ 는 국소적 온도 변화이다. 식 (1)에서 $\delta V(x)$ 는 레이저 빔에 의한 국소적 가열이 시료전체의 크기에 비해 매우 작다고 가정하면 $\partial \rho(x, J_B) / \partial T$ 에 비례하므로 $\delta V(x)$ 의 온도 의존성을 측정함으로써 $\partial \rho(x, J_B) / \partial T$ 를 얻을 수 있다.

국소적인 가열을 시료면에 대해서 2차원적으로 스캔을 하면 레이저 빔의 주사로 인한 반응 신호가 시료면의 빔의 위치좌표의 함수로 기록이 되고 이 데이터를 2차원 혹은 3차원으로 형상화할 수 있는데 이 때 나타나는 전압 신호의 온도에 따른 경향은 Fig. 1과 같이 위치별로 다른 형태의 그래프를 나타내게 되고 이러한 차이점이 각 지점의 초전도 특성의 차이점을 나타내게 된다. 측정되는 전압 신호의 변화는 레이저 빔이 주사되는 지점의 국소적인 특성과 관련이 있다.

III. 실험

본 연구의 목적은 고온 초전도 선재 시료를 펄라멘트 구조를 가지는 형태로 만든 후 임계 온도와 임계 전류의 공간적 분포를 분석하는 것이다. 이를 위해 고온 초전도 선재 시료가 외부 자기장 및 전류가 인가된 상황에서도 초

전도 특성을 안정적으로 유지하고 실제 초전도 응용 기기가 사용될 것으로 예상되는 77 K 부근의 극저온 환경 하에서 실험이 진행되어야 한다. 뿐만 아니라, 시료 외부에서 전류 및 레이저 빔을 시료에 가해주고 신호를 측정할 수 있는 환경도 조성해야 하므로 이 조건들을 충족할 수 있도록 시스템을 구성하였다.

이러한 조건을 충족하기 위해 제작한 LTSLM은 저온 진공 용기(Cryostat), 국소적 가열(local heating)을 하기 위한 레이저와 집광렌즈(Objective lens), 집광된 레이저 빔을 시료표면과 2차원적으로 나란한 방향으로 정밀하게 이동시킬 3축의 이송 장치 그리고 데이터 수집 장치들로 구성되어 있다. 또한 LTSLM을 PC로 제어하기 위해 상용 제어 계측 소프트웨어를 이용하여 실험용 프로그램을 제작하였다(Fig. 2).

동일한 온도에서 시료 각 부분의 온도에 따른 신호를 측정해야 하므로 온도의 안정성은 실험에서 가장 중요한 요소 중 하나이다. 이러한 이유로 시료가 이중의 진공용기 내부에 위치하도록 장치를 구성하여 온도안정성을 높였고 내부 진공도를 $\sim 10^{-5}$ Torr로 유지한 상태에서 ± 2 mK의 온도안정성을 얻을 수 있었다. 초전도 박막 시료의 표면에 국소적인 가열을 하기 위해 주사되는 레이저는 파장 660 nm의 적색광을 내는 다이오드 레이저를 사용하였고 레이저의 최대 광출력은 36.6 mW로 실험 시 입력전압을 조정하여 조건에 맞는 광출력을 얻었다.

LTSLM의 공간분해능을 높이기 위해서는 시료에 주사되는 레이저 빔의 크기를 최소화해야 한다. 이를 위해 Working distance는 30.5 mm, 개구수(Numerical aperture, N.A.)는 0.28인 대물렌즈를 사용해서 빔을 집광시켰다. 본 연구에 사용된 레이저와 집광렌즈를 이용해서 얻을 수 있는 레이저 빔의 최소직경은 Knife-edge를 이용한 방법과 계산에 의한 결과 모두 $3 \mu\text{m}$ 이었다.

초전도 선재 시료의 초전도 특성의 공간적 분포를 분석하기 위한 시료로서 본 실험에서는 Superpower 社의 상용 YBCO 초전도 선재를 사용하였다. 폭은 4 mm, 두께는 $95 \mu\text{m}$ 이며 이중 YBCO 층의 두께는 약 $1 \mu\text{m}$ 이다. 외부 Cu 층은 묽은 질산용액($\text{HNO}_3 : \text{H}_2\text{O} = 1 : 1.5$)으로 제거하고 Ag 층은 NH_4OH 와 H_2O_2 를 3 대 1의 비율로 섞은 용액으로 제거하였다. 이렇게 해

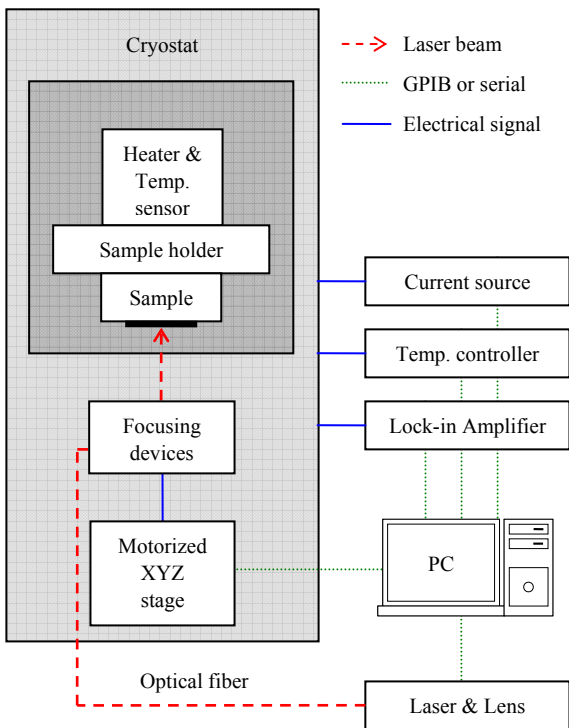


Fig. 2. Schematic diagram of the LTSLM.

서 드러난 YBCO 층을 Chemical etching 공정을 통해서 필라멘트 구조를 가지는 형태로 제작하였다. 필라멘트의 폭은 160 μm 이고 길이는 530 μm 이다.

IV. 결과 및 분석

시료전체의 평균적인 임계온도를 얻기 위해서 시료의 자기 모멘트와 저항의 온도의존성을 분석하였다. 우선 자성측정시스템(MPMS)를 이용한 자기 모멘트의 온도의존성을 측정한 결과 시료의 임계온도가 약 88.0 K 임을 볼 수 있다 (Fig. 3). 다음으로 LTSLM을 이용해서 시료 저항의 온도의존성을 측정한 결과 임계온도가 88.5 K 임을 Fig. 4를 통해 볼 수 있고 임계온도를 측정하기 위한 두가지 실험의 결과가 일치함을 알 수 있다.

레이저 빔의 크기를 최소화한 상태에서 시료의 전면에 대해서 2차원으로 스캔을 할 경우 특정온도에서의 δI 를 시료면의 위치의 함수로 얻을 수 있고 이를 통해 초전도 박막의 위치별 신호를 2차원으로 형상화할 수 있다.

본 연구에서 시료면을 2차원으로 스캔할 때의 조건은 시료에 흘려준 전류는 10 mA이고 레이저의 입력 전압은 3.3 V 였다. Lock-in Reference로 사용할 Chopper의 주파수는 3 kHz 였으며 Pre-amplifier를 이용해서 신호를 100배의 크기로 증폭시켰다. 시료면에 주사되는 집광된 레이저 빔의 스캔간격은 상하, 좌우 방향

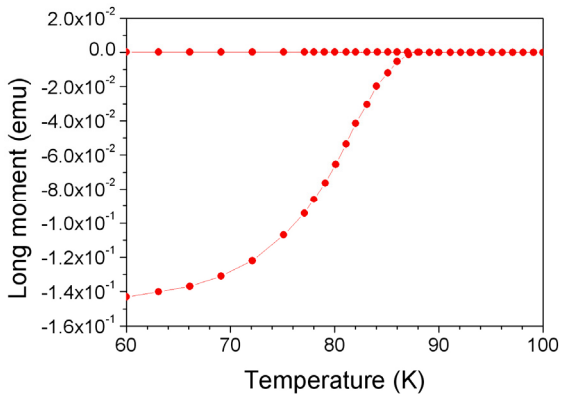


Fig. 3. Field-cooled and zero-field-cooled magnetization as a function of temperature

모두 5 μm 이다.

시료의 임계온도보다 조금 높은 88.6 K에서 2차원으로 스캔한 결과를 Fig. 5에서 볼 수 있다. (스캔한 시료면의 크기는 가로 90 μm , 세로 160 μm 로 길이 축척을 그래프에 나타내었다. 또한 Fig. 5의 우측 스케일은 Lock-in으로 측정된 전압신호를 나타낸다.)

2차원의 그래프에서 볼 수 있듯이 동일온도에서 같은 자극(레이저 빔 주사)을 가했을 때

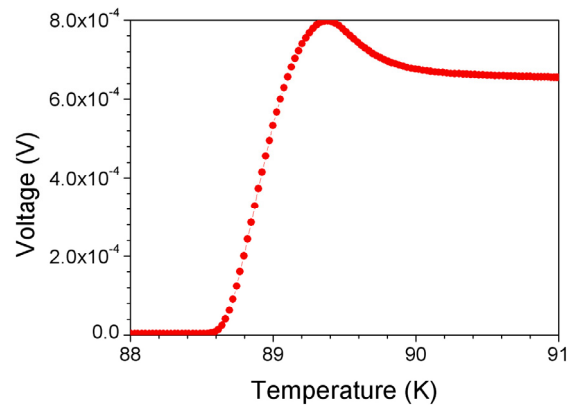


Fig. 4. Sample resistance as a function of temperature (Bias current : 10 mA)

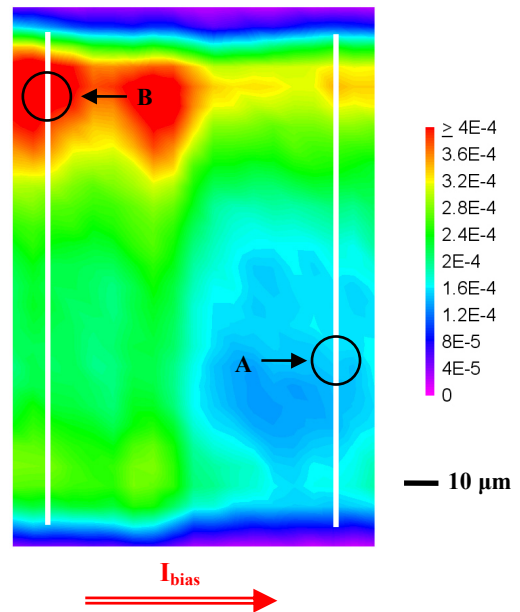


Fig. 5. 2-dimensional scan image of YBCO coated conductor at 88.6 K. ($I_{\text{bias}} = 10 \text{ mA}$)

시료의 각 지점이 자극에 대해서 다른 반응(전압신호의 크기)을 나타내는 것을 알 수 있는데 이것은 특정온도에서 시료면의 각 지점들의 미소온도변화에 따른 저항변화의 크기가 차이가 있음을 나타내며 각 지점의 저항의 온도의존성과 임계온도의 차이를 알 수 있다.

2차원으로 스캔한 결과 중 크게 두 부분을 좀 더 상세히 분석하였다. Fig. 5에서 볼 수 있듯이 시료 중 흰색선으로 표시된 120 μm 길이의 좌, 우 두 영역을 선형으로 스캔하였다. 스캔한 온도 범위는 88.4 K에서 89.3 K까지이며 0.05 K 간격으로 실시하였다. 이 때 레이저 빔이 주사되는 수직 간격은 2 μm 이었다. 이렇게 해서 얻은 결과들 중 각 지점에서의 δV 의 최대값(δV_{max})과 그 때의 온도($T_{\delta V_{\text{max}}}$)를 종합하여 Fig. 6과 같이 나타내었다. Fig. 6의 (a)는 Fig. 5의 흰색선 중 우측선에 해당하는 부분의 결과를 그리고 (b)는 좌측선에 해당하는 부분의 결과를 나타낸다. 시료 전체 영역 중 전반적으로 신호의 크기가 낮은 우측선 영역은 최대전이온도($T_{\delta V_{\text{max}}}$)가 대략 88.65 K에서 88.75 K 사이로 0.1 K의 분포를 보이고 신호의 크기가 높은 좌측선 영역은 최대전이온도가 대략 88.65 K에서 88.70 K 사이로 0.05 K의 분포를 보인다. 최대전이온도를 시료 각 지점의 온도에 관한 초전도 특성을 나타내는 지표로서 고려할 경우 본 연구에 사용된 시료의 온도특성은 상당히 균질한 시료라고 판단할 수 있다.

2차원으로 스캔한 결과에서 각 지점의 전압신호는 상당한 차이를 보이는 데도 불구하고 온도특성은 큰 차이가 없다는 결과를 통해 신호의 차이는 전류특성과 관련이 있다고 유추하고 전류변화에 따른 전압신호를 분석하였다.

2차원 스캔의 결과 중 신호의 크기가 낮은 지점(Fig. 5의 A지점)과 높은 지점(Fig. 5의 B지점) 두 곳을 선택해서 시료에 가해지는 전류의 변화에 따른 전압신호를 분석하였다.

임계온도보다 조금 낮은 온도인 88.3 K에서 전압신호의 전류의존성을 측정된 결과 A지점과 같이 2차원 스캔 결과 상에서 신호의 크기가 낮은 지점이 B지점과 같은 전압신호 크기가 높은 지점보다 임계전류가 더 높은 것을 Fig. 7에서 볼 수 있다. 임계전류밀도로 나타내면 A지점은 $1.44 \times 10^8 \text{ A/m}^2$ 이나 B지점은 $8.75 \times$

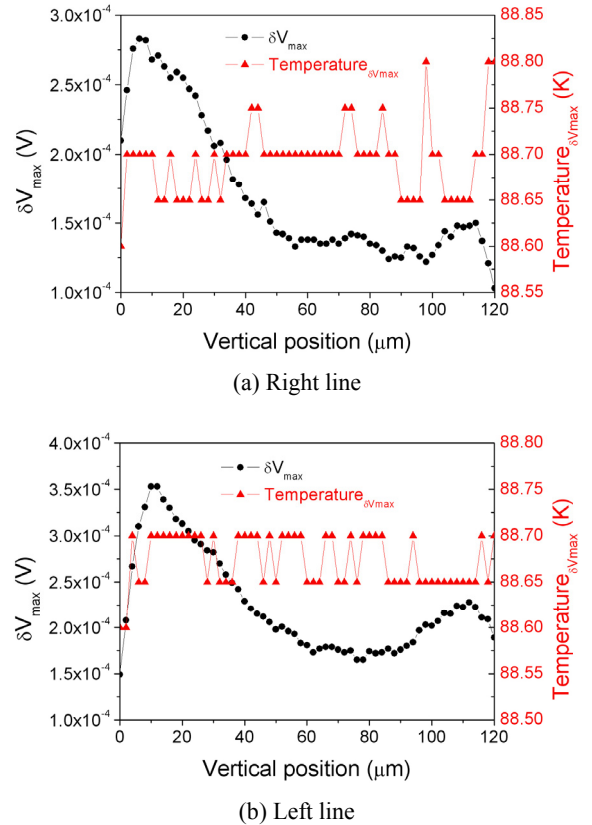


Fig. 6. Scan results of two lines of Fig. 5 ($I_{\text{bias}} = 10 \text{ mA}$).

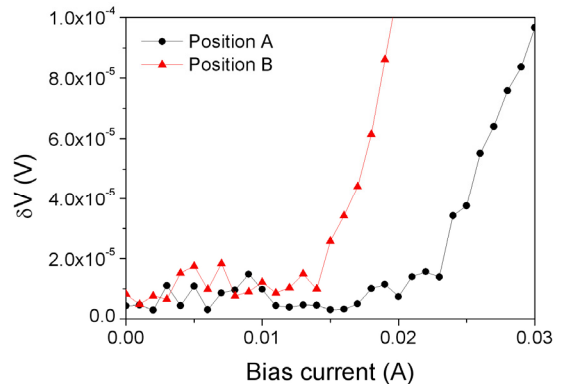


Fig. 7. Bias current dependence of voltage signal of YBCO coated conductor at 88.3 K

10^7 A/m^2 로서 전압신호가 높은 지점의 임계전류밀도가 더 낮음을 알 수 있다.

결국 2차원 스캔 결과 그래프에서 전압신호가 높은 지점은 임계온도의 차이가 크지 않을

경우 임계전류밀도가 낮은 영역에 해당한다고 할 수 있다.

이와 같은 분석을 통해 초전도 선재 시료의 국소적 일부 영역에 대한 임계온도와 임계전류밀도의 공간적 분포를 LTSLM을 통해서 2차원으로 형상화하고 시료의 온도와 가해지는 전류에 따른 초전도 특성의 불균일성을 분석할 수 있었다.

V. 결론

본 연구에서는 초전도 선재의 임계온도와 임계전류밀도의 공간적인 분포를 분석하기 위하여 저온 주사 레이저 현미경(LTSLM)을 제작하였다. 자기장 및 전류가 인가되는 환경하에서 초전도 박막의 에너지 손실을 최소화하는 초전도 선재 구조를 제작하기 위한 Chemical etching 공정을 연구하였다. 본 연구를 위해 제작한 LTSLM은 T=77 K에서 초전도 선재 시료의 국소적 공간의 초전도 특성 분포를 집광된 레이저 빔과 정밀 측정 장치들을 이용하여 10^{-5} Torr의 안정된 진공상태와 ± 2 mK의 온도 안정성을 유지하면서 3 μm 크기의 집광된 레이저를 통해 측정할 수 있다.

실험 결과들을 통해서 본 연구에 사용된 LTSLM 시스템은 고온 초전도 선재의 연구를 위해 유용하게 사용할 수 있는 연구장비로 입증되었다고 할 수 있다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단의 “중성자 조사에 의해 변화하는 초전도재료의 전자기적 특성” 연구과제의 지원에 의하여 연구가 이루어 졌음을 밝히며 그 지원에 감사드린다.

References

- [1] E. H. Brandt, Phys. Rev. B **49** 9024 (1994).
- [2] Th. Schuster, M. V. Indenbom, M. R. Koblischka, H. Kuhn, and H. Kronmuller, Phys. Rev. B **49**, 3443 (1994).
- [3] Y. Mawatari, Phys. Rev. B **54** 13215 (1996).
- [4] T. H. Johansen, M. Baziljevich, H. Bratsberg, Y. Galperin, P. E. Lindelof, Y. Shen and P. Vase, Phys. Rev. B **54** 16264 (1996).
- [5] L. J. Swartzendruber, A. Roitburd, D. L. Kaiser, F. W. Gayle, and L. H. Bennett, Phys. Rev. Lett., vol. **64**, pp. 483–486 (1990).
- [6] G. W. Crabtree, J. Z. Liu, A. Umezawa, W. K. Kwon, C. H. Sowers, S. K. Malik, B. W. Veal, D. J. Lam, M. B. Brodsky, and J. W. Downey, Phys. Rev. B, vol. **36**, pp. 4021–4024 (1987).
- [7] R. Gross, M. Hartmann, K. Hipler, R. P. Huebener, F. Kober, and D. Koelle, IEEE. Trans. on Magnetics, vol. **25**, 2250 (1989).
- [8] N. Dieckmann, A. Bock, and U. Merkt, Appl. Phys. Lett. **68** 3626 (1996).
- [9] D. Abraimov, A. G. Sivakov, A. V. Lukashenko, M. V. Fistul, P. Muller and A. V. Ustinov, IEEE. Trans. on Appl. Supercond. Vol. **11**, 3170 (2001).
- [10] T. Takanobu, Kiss, Masayoshi Inoue, Minoru Yasunaga, Hideaki Tokutomi, Yasuhiro Iijima, Kazuomi Kakimoto, Takashi Saitoh, Yoshitaka Tokunaga, Teruo Izumi, and Yuh Shiohara, IEEE. Trans. on Appl. Supercond., vol. **15**, 3656 (2005).
- [11] L. B. Wang, M. B. Price, C. Kwon, and Q. X. Jia, IEEE. Trans. on Appl. Supercond., vol. **13**, 2611 (2003).
- [12] C. Kwon, L. B. Wang, S. Seo, B. H. Park, and Q. X. Jia, IEEE. Trans. on Appl. Supercond., vol. **13**, 2894 (2003).
- [13] L. B. Wang, M. B. Price, J. L. Young, C. Kwon, Timothy J. Haugen, Paul N. Barnes, Physica C **405** 240-244 (2004).
- [14] L. B. Wang, P. Selby, C. Khanal, George Levin, Timothy J. Haugen, Paul N. Barnes, and C. Kwon, IEEE. Trans. on Appl. Supercond., vol. **15**, 2950 (2005).
- [15] L. B. Wang, M. B. Price, J. L. Young, C. Kwon, George A. Levin, Timothy J. Haugen, Paul N. Barnes, Physica C **419** 79-84 (2005).
- [16] Clem J R and Huebener R P J. Appl. Phys. **51** 2764 (1980).
- [17] R. Gross, D. Koelle, Rep. Prog. Phys. **57** 651 (1994).