

Enhancement of lower critical field of MgB₂ thin films through disordered MgB₂ overlayer

Soon-Gil Jung^{a, b}, Duong Pham^b, Won Nam Kang^b, Byung-Hyuk Jun^c, Chorong Kim^d, Sunmog Yeo^d, and Tuson Park^{a, b, *}

^a Center for Quantum Materials and Superconductivity (CQMS), Sungkyunkwan University, Suwon 16419, Korea

^b Department of Physics, Sungkyunkwan University, Suwon 16419, Korea

^c Materials Safety Technology Development Division, Korea Atomic Energy Research Institute, Daejeon 34057, Korea

^d Korea Multi-purpose Accelerator Complex, Korea Atomic Energy Research Institute, Gyeongju, Gyeongbuk, 38180, Korea

(Received 28 November 2022; revised or reviewed 27 December 2022; accepted 28 December 2022)

Abstract

We investigate the effect of surface disorder on the lower critical field (H_{c1}) of MgB₂ thin films with a thickness of 850 nm, where the disorder on the surface region is produced by the irradiation of 140 keV Co ions with the dose of 1×10^{14} ions/cm². The thickness of the damaged region by the irradiation is around 143 nm, corresponding to ~17% of the whole thickness of the film, thereby forming the disordered MgB₂ overlayer on the pure MgB₂ layer. The magnetic field dependence of magnetization, $M(H)$, for the pristine MgB₂ thin film and the film with overlayer is measured at various temperatures, and H_{c1} is determined from the difference (ΔM) between the Meissner line and magnetization signal with the criterion of $\Delta M = 10^{-3}$ emu. Intriguingly, the film with the disordered overlayer shows a remarkably large $H_{c1}(0) = 108$ Oe compared to the $H_{c1}(0) = 84$ Oe of pristine film, indicating that the disordered MgB₂ overlayer on the pure MgB₂ layer serves to prevent the penetration of vortices into the sample. These results provide new ideas for improving the superheating field to design high-performance superconducting radio-frequency cavities.

Keywords: lower critical field, MgB₂ thin films, ion irradiation, disordered overlayer

1. INTRODUCTION

2001년 이붕소마그네슘(magnesium diboride, MgB₂)에서 초전도성이 발견된 이후, 지금까지 이 물질에 대한 물성 연구뿐만 아니라 상용화를 위해 많은 연구가 진행되었다 [1–5]. 금속성을 가진 MgB₂는 약 40 K의 높은 초전도 임계온도 (superconducting critical temperature, T_c)를 가지고 있으며, 높은 초전도 임계전류밀도(critical current density, J_c)를 포함하여 우수한 초전도 특성을 보임으로써 현재 상용화되어 가장 널리 사용되고 있는 NbTi ($T_c \sim 9$ K)를 대체하여 사용하기에 가능성이 매우 높은 물질로 여겨지고 있다 [6–8].

초전도체는 저항이 “0”인 물질로 좁은 면적에 대전류를 흘릴 수 있어, 전력손실 없이 대전류 송전이 가능한 초전도케이블 (superconducting cable) 뿐만 아니라, 자기공명영상장치 (magnetic resonance imaging, MRI) 등 대전류를 이용한 고자기장 발생장치에 널리 사용되고 있다 [9, 10]. 또한, 초전도체를 마이크로파 공동 공진기(microwave resonant cavity)에 사용할 경우 큐 인자(quality factor, Q)를 획기적으로 증가시킬 수 있어, 고에너지 입자가속기(particle accelerators)에 사용하기 위해 활발히 연구되고 있다 [11, 12]. 초전도체의 경우 구리(Cu)와 같이 전기전도도(electrical conductivity)가 높은 금속보다 공진기의 표면저항(surface resistance, R_s)을 현저히 줄일 수 있어 큰 Q 값을 기대할 수 있다. 이로부터 인가한 고주파에 대한 에너지 손실을 줄여 입자가속기의 효율을 크게 향상시킬 수 있다.

현재 초전도 공진기(superconducting cavity)의 경우 나이오븀(Nb)이 가장 널리 사용되고 있는데, 낮은 표면저항 및 높은 임계온도 등의 이유로 MgB₂가 차세대 초전도 공진기에 사용될 수 있을 것으로 기대되고 있다 [13]. 하지만 MgB₂의 경우 하부임계자기장(lower critical field, H_{c1})이 낮아 이를 향상시키는 일이 시급하다 [14]. 이론적으로, 인가한 자기장의 크기가 하부임계자기장 이상에서는 양자화된 자기 소용돌이(vortex)가 시료 내부로 침투할 수 있고, 이들의 운동으로 인하여 저항 및 열 소모(heat dissipation)를 유발하여 공진기의 성능을 저하시키게 된다 [11, 15].

최근 Nb 초전도체 표면에 다양한 코팅(coating) 방법을 이용하거나, 무질서(disorder)를 증가시킬 경우 하부임계 자기장 혹은 자기 소용돌이가 생성되어 침투할 때까지의 준안정(metastable) 상태 임계자기장(superheating field, H_{sh})이 향상된다는 연구결과들이 보고되고 있다 [16–18]. 이에 본 연구에서는 저에너지 이온조사를 이용하여 고품질의 MgB₂ 박막 표면에 무질서를 증가시키고 이로부터 하부임계자기장 향상에의 가능성을 연구하였다.

본 연구를 위하여 먼저 혼성물리화학증착(hybrid physical-chemical vapor deposition, HPCVD)법을 이용하여 850 nm의 두께를 가지는 고품질의 MgB₂ 박막을 준비하였다. 이후 순수한(pristine) MgB₂ 층 위에 무질서가 형성된 MgB₂ 층 (disordered overlayer)을 제작하기 위하여, 140 keV 에너지를 이용하여 조사량 1×10^{14} 개/cm²의 코발트(Co) 이온을 제작된 고품질의 MgB₂ 박막에 조사(irradiation) 하였다. 이로부터 약 143 nm 정도의 두께를 가지는 무질서화된 MgB₂ 층을 형성

* Corresponding author: tp8701@skku.edu

시켰다. 그 결과, 흥미롭게도 무질서화된 위 층을 가진 MgB₂ 박막에서 0 K에서의 하부임계자기장의, $H_{c1}(0)$, 크기가 29% (84 → 108 Oe) 정도 증가함을 보였다. MgB₂ 박막에 무질서화된 위 층을 형성할 경우 볼텍스가 시료내부로 침투하지 못하게 하는 임계자기장이 향상 될 수 있다는 본 연구결과는, 초전도 공진기뿐만 아니라 마이크로파를 이용한 초전도 장치(device) 개발에 응용될 가능성이 높을 것이라 사료된다.

2. EXPERIMENTAL METHODS

혼성물리화학증착(HPCVD)법을 이용하여 *c*-축으로 성장한 고품질의 MgB₂ 박막을 제작하였다 [19, 20]. MgB₂ 박막은 *c*-cut 사파이어(Al₂O₃) 기판 위에 증착하였으며, 제작된 박막의 두께는 850 nm (MB850nm)이다. MgB₂ 박막의 표면근방에 무질서화된 MgB₂ 층을 형성시키기 위해, 에너지 140 keV를 이용하여 1×10^{14} 개/cm²의 코발트 이온을 조사하였다. 이온조사는 경주에 위치한 한국원자력연구원 양성자과학연구단에 있는 금속이온 빔 조사장치를 이용하여 수행되었다. 140 keV 에너지의 코발트 이온을 밀도 2.57 g/cm³을 가지는 MgB₂에 조사할 경우 생성되는 무질서의 정도는 SRIM (The Stopping and Range of Ions in Matter) 시뮬레이션 프로그램을 사용하여 유추하였다 [21].

140 keV 코발트 이온조사 전후에 대한 X-선 회절(X-ray diffraction, XRD) 분석을 통하여 무질서화된 MgB₂ 층의 생성 유무를 확인하였다. 초전도 임계온도는 물성특성측정장비(Physical Property Measurement System, PPMS 9 T, Quantum Design)와 자기특성측정장비(Magnetic Property Measurement System, MPMS 5 T, Quantum Design)를 이용하여 온도에 따른 전기저항(electrical resistivity, ρ) 및 자화(magnetization, M) 특성을 각각 측정하여 확인하였다. 전기저항은 4-단자법(4-probe method)을 이용하여 측정하였고, 와이어(wire)와 시료 사이에 금 패드(Au pad)를 사용하여 접촉저항(contact resistance)을 최소화하였다. 하부임계자기장은 자기특성측정장비를 이용하여 온도 2–39 K 범위에서 자기 이력 곡선(magnetization hysteresis loop)을 측정하고 이를 분석하여 구하였다. 이때, 인가한 자기장의 방향은 시료의 표면에 수직인 방향($H//c$)이다.

3. RESULTS AND DISCUSSION

그림 1(a)는 140 keV 에너지의 코발트 이온을 850 nm의 두께를 가지는 MgB₂ 박막에 조사할 경우 생성되는 변위손상(displacement damage) 정도를 SRIM 시뮬레이션 프로그램을 이용하여 구한 뒤, 조사량 1×10^{14} Co ions/cm²에 해당하는 무질서 정도를 아래 식(1)에서와 같이 주어지는 조사량 단위(displacements per atom, dpa)로 나타낸 것이다.

$$\begin{aligned} \text{dpa} &= \left(\frac{\text{displacements}}{\text{ions} \times \text{\AA}} \right) \times \left(\frac{10^8 (\text{\AA}/\text{cm}) \times \text{dose} \left(\frac{\text{ions}}{\text{cm}^2} \right)}{\rho_A \left(\frac{\text{atoms}}{\text{cm}^3} \right)} \right) \\ &= \left(\frac{\# \text{ of displacements}}{\text{atom}} \right) \quad (1) \end{aligned}$$

여기서, ρ_A 는 표적물질의 원자밀도(atomic density)로

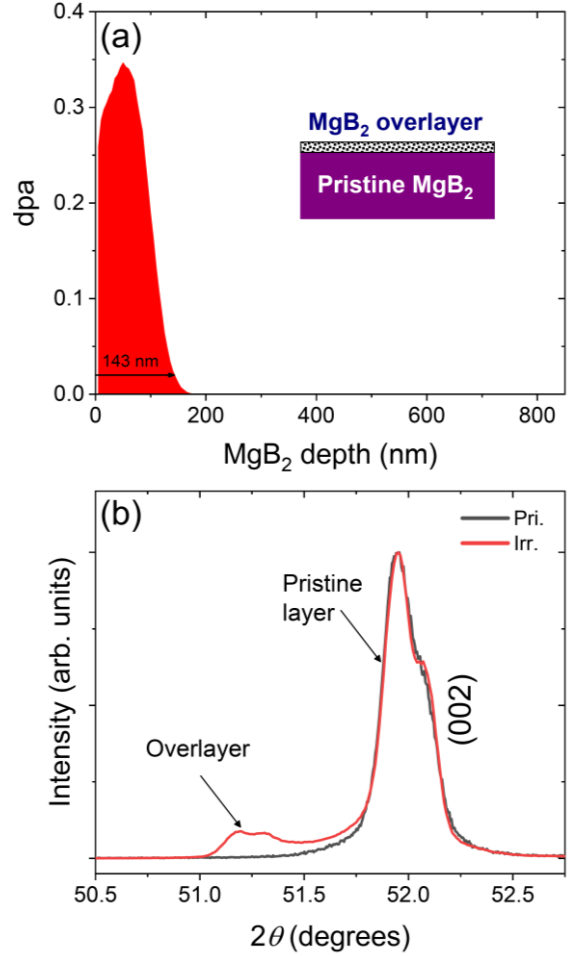


Fig. 1. (a) Displacements per atom (dpa) as a function of MgB₂ depth from the sample's surface, induced by 140 keV-Co-ion irradiation. The dpa value corresponds to a dose level of 1×10^{14} Co ions/cm². The thickness of MgB₂ overlayer (~ 143 nm) is determined at dpa = 0.02, which is a sufficient disorder level to degrade the superconductivity of MgB₂. (b) X-ray diffraction (XRD) for pristine (Pri.) and irradiated (Irr.) MgB₂ thin films, reflecting the formation of disordered MgB₂ overlayer by 140 keV-Co-ion irradiation.

MgB₂는 약 3.44×10^{22} atoms/cm³의 값을 가진다. MgB₂의 초전도 임계온도가 10 K 이하로 상당히 감소할 것으로 예상되는 지점인 dpa = 0.02 점을 기준으로 하여 표면근방에서 무질서가 형성된 위 층(disordered overlayer)의 두께(143 nm)를 결정하였다 [22, 23].

그림 1(b)에 나타난 X-선 회절 패턴을 살펴보면 MgB₂ 결정의 (002)면에 해당하는 봉우리(peak)가 두 개로 갈라진 것을 볼 수 있다. 이는 코발트 이온조사로 인해 동일한 MgB₂ 물질임에도 불구하고, 시료의 표면 근방에 무질서 증가로 인해 *c*-축이 늘어난 MgB₂ 층이 형성된 것을 보여주는 명확한 증거라 할 수 있다. 물질에 저에너지 이온을 조사하면, 주입한 이온과 타겟 물질에 있는 원자 간의 탄성충돌 및 다단계 충돌(collision cascade)로 인해 격자 빈자리(vacancy)와 격자 틈새(interstitial)가 생성된다. 이로부터 결정화된 물질에 격자 변형(lattice strain)이 발생하고, 결정구조에 무질서를 야기하는 것으로 알려져 있다 [24–26].

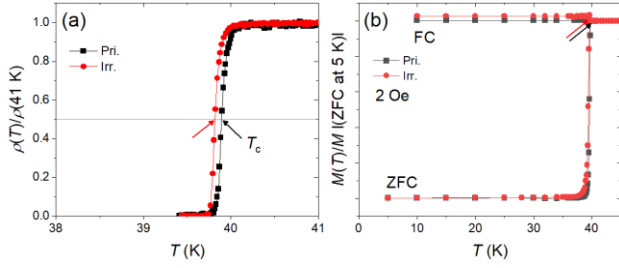


Fig. 2. Temperature dependence of (a) electrical resistivity (ρ) and (b) magnetization (M) near superconducting transition temperature for pristine and 140 keV Co-ion-irradiated MgB_2 thin films. Here, the $\rho(T)$ and the $M(T)$ were normalized to the ρ at 41 K and the absolute zero-field-cooled M at 5 K, respectively, for comparison.

140 keV 코발트 이온조사로 인해 형성된 무질서화된 MgB_2 위 층이 MgB_2 박막 전체의 임계온도에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 전기저항(electrical resistivity, ρ) 및 자화(magnetization, M) 특성의 온도 의존성을 측정하였고, 이를 그림 2(a)와 (b)에 각각 나타내었다. 전기저항의 경우 4 단자를 MgB_2 위 층에 접촉시켜 측정하였다. 조사(irradiation) 전 39.90 K이었던 초전도 임계온도는 1×10^{14} 개/cm²의 코발트 이온조사 후 39.82 K로 미미한 감소를 보였다. 초전도 임계온도는 그림 2(a)에 화살표로 표기한 것처럼 초전도 전이가 시작되는 온도에서의 전기저항 값이 절반으로 줄어드는 지점을 기준으로 결정하였다. 전기저항에서 얻은 초전도 임계온도의 경향성은 그림 2(b)에 나타난 자화 특성 곡선에서 보이는 무자장 냉각(zero-field cooling, ZFC)과 자장 냉각(field cooling, FC)이 비가역적(irreversible)이 되는 지점에 해당하는 온도 결과와 잘 부합함을 볼 수 있다. 코발트 이온조사 전후 무자장 냉각과 자장 냉각이 비가역적이 되는

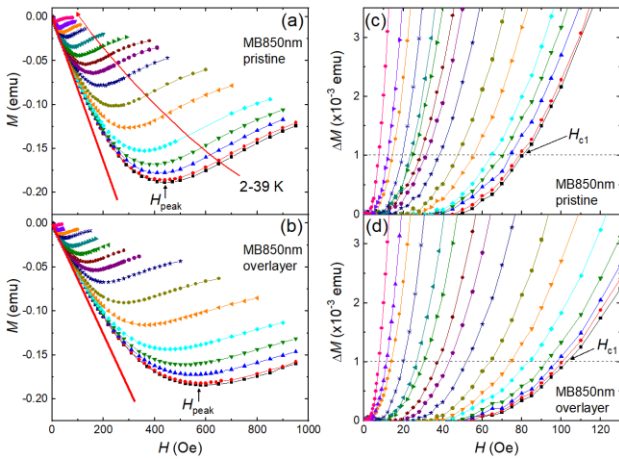


Fig. 3. Magnetic field dependence of the magnetization (M) at various temperatures from 2 to 39 K for (a) the pristine MgB_2 and (b) the MgB_2 with a disordered overlayer. The red solid lines reflect the Meissner line. (c) and (d) Difference between the Meissner line and the measured magnetization signal (ΔM) as a function of magnetic fields for the pristine MgB_2 and the MgB_2 with the overlayer, respectively. H_{c1} was evaluated from the criterion of $\Delta M = 10^{-3}$ emu, as indicated by the dotted lines and arrows.

지점의 온도는 각각 39.80 K와 39.70 K를 보였는데, 초전도 시료의 품질이 우수할 경우 이 온도는 볼텍스 운동이 시작되는 지점으로 전기저항이 “0”이 되는 온도에 해당한다.

MgB_2 박막의 표면 근방에 형성된 무질서화된 위 층이 하부임계자기장에 미치는 영향을 살펴보기 위하여, 이온조사를 이용하여 무질서화된 위 층이 형성되기 전후에 대하여 자기장에 따른 자화 특성 곡선을 측정하고 이를 그림 3(a)와 (b)에 각각 나타내었다. 제2종 초전도체(type-II superconductor)에서 하부임계자기장은 볼텍스 하나가 초전도체 내부로 침투하는 자기장에 해당한다. 따라서 제2종 초전도체에 인가한 자기장의 크기가 하부임계자기장 보다 작을 경우, 마이스너 효과(Meissner effect)로 인해 자화 값은 인가한 자기장이 증가할 수록(인가한 자기장의 방향과 반대 방향으로) 선형적인 증가를 보일 것으로 예상할 수 있다. 하지만, 그림 3(a)와 (b)에서 볼 수 있듯 자화 값이 선형적으로 증가하는 영역을 벗어 나더라도, 인가한 자기장이 증가함에 따라 특정 자기장(H_{peak})까지 계속해서 증가하는 것을 볼 수 있다. 이는 시료의 모양, 자속 뭉침 힘(flux pinning force),

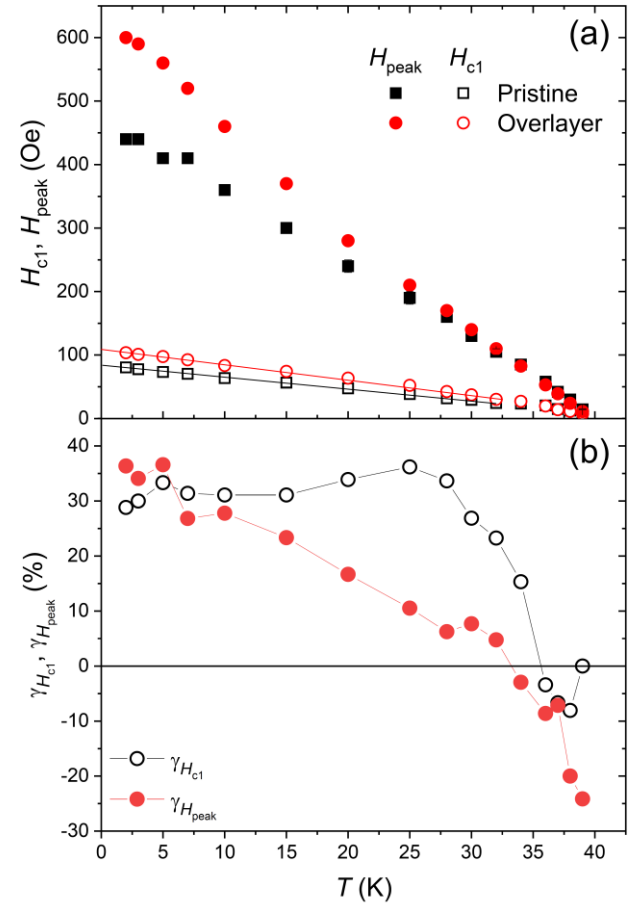


Fig. 4. (a) H_{c1} and H_{peak} as a function of temperature for pristine MgB_2 thin film and the MgB_2 film with a disordered overlayer, indicating a large improvement of both H_{c1} and H_{peak} owing to the disordered overlayer. H_{c1} at 0 K, $H_{\text{c1}}(0)$, for both cases was estimated from the linear extrapolation, as indicated by solid lines. (b) Temperature dependence of the ratio of H_{c1} ($=\gamma_{H_{\text{c1}}}$) and H_{peak} ($=\gamma_{H_{\text{peak}}}$) for the pristine MgB_2 thin film and the MgB_2 film with the disordered overlayer.

그리고 표면 장벽(surface barrier)등의 영향에 의한 것으로 여겨지고 있으나, 아직까지 정확한 이유는 밝혀지지 않은 상황이다 [27, 28].

여기서, 인가한 자기장의 크기에 따라 자화 값이 선형적인 감소를 보이는 영역을 마이스너 라인(Meissner line)이라 하고, 이를 그림 3(a)와 (b)에 붉은색 실선으로 표시하였다. 볼텍스가 시료 내부로 침투하게 되면 초전도체의 반자성 신호(diamagnetic signal)를 감소시키게 되고, 이로부터 자화 값의 자기장 의존성이 마이스너 라인을 벗어나게 된다. 따라서, 일정 온도에서의 하부임계자기장은 측정된 자화 값이 마이스너 라인을 벗어나는 지점이 될 것이다 [29]. 본 연구에서는 그림 3(c)와 (d)에서 볼 수 있는 박와 같이 마이스너 라인과 측정된 자화 값의 차이(ΔM)가 10^{-3} emu 가 되는 지점을 기준으로 하여 하부임계자기장을 구하였고, 그 지점을 화살표로 표기하였다.

그림 4(a)는 이온이 조사되지 않은 순수한 MgB₂ 박막과 이온을 조사하여 무질서화된 위 층이 있는 MgB₂ 박막에 대한 H_{c1} 과 H_{peak} 의 온도의존성을 나타낸다. 흥미롭게도 무질서화된 위 층을 생성할 경우, H_{c1} 과 H_{peak} 두 임계자기장 모두에서 큰 증가를 보였다. H_{c1} 의 경우 온도가 감소함에 따라 선형적인 증가를 보였고, 이로부터 유추한 0 K에서의 하부임계자기장 값 $H_{c1}(0)$ 은 84 Oe에서 무질서화된 위 층 생성 후 108 Oe로 큰 증가를 보였다.

무질서화된 위 층에 의한 H_{c1} 과 H_{peak} 의 변화를 μ_{Hc1} 과 μ_{Hpeak} 을 그림 4(b)에 나타내었다. 초전도 임계온도 근방에서는 무질서화 된 위 층 생성 후 H_{c1} 과 H_{peak} 두 값 모두 감소하지만, 온도가 감소함에 따라 30% 이상의 큰 증가를 보인다. 이때, H_{c1} 의 경우 35 K 아래의 온도에서 급격한 증가를 보이고, H_{peak} 의 경우 온도가 감소함에 따라 선형적으로 증가함을 볼 수 있다. 조사량 1×10^{14} 개/cm²에 해당하는 코발트 이온이 조사된 MgB₂ 층의 경우 초전도 임계온도가 10 K 이하로 감소하지만 [22, 30], 이온조사에 영향을 받지 않은 MgB₂ 층과의 근접효과(proximity effect)로 인해 초전도 임계온도가 초기 상태로 회복될 수 있는 것으로 보고되어 있다 [30, 31]. 하지만 임계온도 근처에서는 무질서화 된 MgB₂ 층의 초전도 부피분율(superconducting volume fraction)이 완전히 회복되지 않아 H_{c1} 과 H_{peak} 의 감소가 나타나는 것으로 사료된다. 서로 다른 초전도물질들을 이용하여 이중층(bilayer) 혹은 다층(multilayer)을 형성할 경우 층간의 상호작용으로 인해 상부 임계자기장(upper critical field, H_{c2})의 불연속적인 온도 의존성 등 새로운 형태의 초전도 특성이 발현될 수 있는 것으로 보고되고 있으나 [32, 33], 아직 초전도 다층을 이용한 H_{c1} 변화에 관한 연구는 미미하므로 이에 대한 이해를 위하여 깊이 있는 연구가 필요할 것이다. 고품질의 초전도 박막의 표면에 무질서화된 초전도 층 형성을 통하여 H_{c1} 과 H_{peak} 을 향상시킬 수 있다는 본 연구 결과는, 초전도 공진기의 성능 향상을 위한 하부임계자기장 및 superheating field를 증가시키기 위한 새로운 방안이 될 수 있을 것으로 기대된다.

4. CONCLUSION

본 연구에서는 이온조사를 이용하여 무한제(cryogen-free) 기반의 차세대 초전도 공진기 개발에 적합한 초전도 재료인

MgB₂의 하부임계자기장을 향상시키는 연구를 수행하였다. 이온조사로부터 무질서화된 위 층(disordered overlayer)이 형성된 경우 초전도 임계온도에는 거의 변화가 없음에도 불구하고, 하부임계자기장의 경우 상당한 증가를 보였고, 0 K에서의 하부임계자기장은 84 Oe 에서 108 Oe로 약 29% 정도 증가하였다. MgB₂ 박막에 무질서화된 위 층 형성을 통하여 하부임계자기장이 향상 될 수 있다는 본 연구결과는, 초전도 공진기를 비롯하여 마이크로파를 이용한 다양한 초전도 장치 개발 연구에 활용될 수 있을 것이라 사료된다.

ACKNOWLEDGMENTS

We wish to acknowledge the support of the accelerator group and operators of KOMAC (KAERI). This study was supported by the National Research Foundation (NRF) of Korea through a grant funded by the Korean Ministry of Science and ICT (No. 2021R1A2C2010925) and by the Basic Science Research Program through the NRF of Korea funded by the Ministry of Education (NRF-2019R1F1A1055284 and NRF-2021R1I1A1A01043885). This work was also supported by the National Research Foundation Grant (NRF-2020M2D8A2047959) funded from Ministry of Science and ICT (MSIT) of Republic of Korea.

REFERENCES

- [1] J. Nagamatsu, N. Nakagawa, T. Muranaka, Y. Zenitani, and J. Akimitsu, "Superconductivity at 39 K in magnesium diboride," *Nature*, vol. 410, pp. 63-64, 2001.
- [2] M. Angst, S. L. Bud'ko, R. H. T. Wilke, and P. C. Canfield, "Difference between Al and C doping in anisotropic upper critical field development in MgB₂," *Phys. Rev. B*, vol. 71, pp.144512, 2005.
- [3] D. C. Larbalestier, A. Gurevich, D. M. Feldmann, and A. Polyanski, "Enhancement of the high-magnetic-field critical current density of superconducting MgB₂ by proton irradiation," *Nature*, vol. 414, pp. 368-377, 2001.
- [4] M. Angst, S. L. Bud'ko, R. H. T. Wilke, and P. C. Canfield, "Difference between Al and C doping in anisotropic upper critical field development in MgB₂," *Phys. Rev. B*, vol. 71, pp.144512, 2005.
- [5] S. -G. Jung, et al., "A simple method for the enhancement of Jc in MgB₂ thick films with an amorphous SiC impurity layer," *Supercond. Sci. Technol.*, vol. 22, pp. 075010, 2009.
- [6] K. Vinod, R. G. A. Kumar, and U. Syamaprasad, "Prospects for MgB₂ superconductors for magnet application," *Supercond. Sci. Technol.*, vol. 20, pp. R1-R13, 2007.
- [7] H. -J. Kim, W. N. Kang, E. -M. Choi, M. -S. Kim, K. H. P. Kim, and S. -I. Lee, "High current-carrying capability in c-axis-oriented superconducting MgB₂ thin films," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 87, pp. 087002, 2001.
- [8] D. C. Larbalestier, et al., "Strongly linked current flow in polycrystalline forms of the superconductor MgB₂," *Nature*, vol. 410, pp. 186-189, 2001.
- [9] D. Y. Bugoslavsky, et al., "High-T_c superconducting materials for electric power applications," *Nature*, vol. 411, pp. 561-563, 2001.
- [10] M. Parizh, Y. Lvovsky, and M. Sumption, "Conductors for commercial MRI magnets beyond NbTi: requirements and challenges," *Supercond. Sci. Technol.*, vol. 30, pp. 014007, 2017.
- [11] H. Padamsee, "The science and technology of superconducting cavities for accelerators," *Supercond. Sci. Technol.*, vol. 14, pp. R28-R51, 2001.
- [12] X. Han, C. -L. Zou, W. Fu, M. Xu, Y. Xu, and H. X. Tang, "Superconducting Cavity Electromechanics: The Realization of an Acoustic Frequency Comb at Microwave Frequencies," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 129, pp. 107701, 2022.

- [13] B. B. Jin, et al., "Energy gap, penetration depth, and surface resistance of MgB_2 thin films determined by microwave resonator measurements", *Phys. Rev. B*, vol. 66, pp. 104521, 2002.
- [14] T. Tan, et al., "Enhancement of lower critical field by reducing the thickness of epitaxial and polycrystalline MgB_2 thin films", *APL Mater.*, vol. 3, pp. 041101, 2015.
- [15] M. K. Transtrum, G. Catelani, and J. P. Sethna, "Superheating field of superconductors within Ginzburg-Landau theory", *Phys. Rev. B*, vol. 83, pp. 094505, 2011.
- [16] Z. Lin, et al., "Enhancement of the lower critical field in FeSe-coated Nb structures for superconducting radio-frequency applications", *Supercond. Sci. Technol.*, vol. 34, pp. 015001, 2021.
- [17] A. Gurevich, "Enhancement of rf breakdown field of superconductors by multilayer coating", *Appl. Phys. Lett.*, vol. 88, pp. 012511, 2006.
- [18] C. Z. Antoine, J. -C. Villegier, and G. Martinet, "Study of nanometric superconducting multilayers for RF field screening applications", *Appl. Phys. Lett.*, vol. 102, pp. 102603, 2013.
- [19] W. K. Seong, et al., "Growth of superconducting MgB_2 thin films by using hybrid physical-chemical vapor deposition", *J. Korean Phys. Soc.*, vol. 51, pp. 174-177, 2007.
- [20] W. K. Seong, S. Oh, and W. N. Kang, "Perfect domain-lattice matching between MgB_2 and Al_2O_3 : single-crystal MgB_2 thin films grown on sapphire", *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 51, pp. 083101, 2012.
- [21] The damage events by 140-keV Co ion irradiation in the MgB_2 were calculated using the SRIM software (www.srim.org/)
- [22] S. -G. Jung, et al., "Improvement of bulk superconducting current capability of MgB_2 films using surface degradation", *Scr. Mater.*, vol. 209, pp. 114424, 2022.
- [23] A. A. Baker, et al., "Control of superconductivity in MgB_2 by ion bombardment", *J. Phys. D: Appl. Phys.*, vol. 52, pp. 295302, 2019.
- [24] D. M. Parkin, "Radiation effects in high-temperature superconductors: A brief review", *Metall. Mater. Trans. A*, vol. 21, pp. 1015-1019, 1990.
- [25] S. -G. Jung, et al., "Influence of carbon-ion irradiation on the superconducting critical properties of MgB_2 thin films", *Supercond. Sci. Technol.*, vol. 32, pp. 025006, 2019.
- [26] S. -G. Jung, et al., "Effect of thermal annealing on low-energy C-ion irradiated MgB_2 thin films", *Progress in Superconductivity and Cryogenics*, vol. 21, pp. 13-17, 2019.
- [27] E. H. Brandt, "Geometric edge barrier in the Shubnikov phase of type-II superconductors", *Low. Temp. Phys.*, vol. 27, pp. 723-731, 2001.
- [28] T. Matsushita, "On the surface barrier in type II superconductors", *J. Phys. Soc. Jpn.*, vol. 52, pp. 241-245, 1983.
- [29] S. T. Renosto, et al., "Evidence of multiband behavior in the superconducting alloy $\text{Zr}_{0.96}\text{V}_{0.04}\text{B}_2$ ", *Phys. Rev. B*, vol. 87, pp. 174502, 2013.
- [30] S. -G. Jung, et al., "Giant proximity effect in single-crystalline MgB_2 bilayers", *Sci. Rep.*, vol. 9, pp. 3315, 2019.
- [31] S. -G. Jung, et al., "Field-induced quantum breakdown of superconductivity in magnesium diboride", *NPG Asia Mater.*, vol. 13, pp. 55, 2021.
- [32] S. Takahashi and M. Tachiki, "New phase diagram in superconducting superlattices", *Phys. Rev. B*, vol. 34, pp. 3162-3164, 1986.
- [33] F. S. Portela, et al., "Superconducting properties of Nb/Pb/Nb trilayer", *Supercond. Sci. Technol.*, vol. 28, pp. 034001, 2015.