

Thermal and Magnetic Characterization of Amorphous Alloy Ribbons as a Function of Fe:B Ratio

Dongyoung Han and Kwanghyo Son*

Department of Physics Education, Kongju National University, Gongju 32588, Korea

Hyunkyung Choi and Young Rang Uhm

HANARO Utilization Division, Korea Atomic Energy Research Institute (KAERI), Daejeon 34057, Korea

Sunghyun Kim and Hyunchul Oh

Department of Chemistry, Ulsan National Institute of Science and Technology, Ulsan 44919, Korea

(Received 14 July 2025, Received in final form 19 August 2025, Accepted 21 August 2025)

In this study, the thermal and magnetic properties of amorphous alloy ribbons with varying Fe:B ratios were systematically investigated. Differential scanning calorimetry (DSC) revealed that the crystallization temperatures and the clarity of the exothermic peaks changed depending on the composition. As the B content increased, the first exothermic peak associated with the formation of the α -Fe phase became less distinct. Magnetic hysteresis (M-H) curve measurements at room temperature confirmed that all samples exhibited soft magnetic behavior with low coercivity and rapid magnetic saturation. However, saturation magnetization and coercivity did not show clear trends with compositional changes. Mössbauer spectroscopy indicated changes in local magnetic environments depending on the Fe:B ratio. These findings provide useful insights for compositional design and heat-treatment optimization of amorphous soft magnetic materials.

Keywords : Mössbauer spectroscopy, Soft magnetic materials, Amorphous alloy

비정질 합금 리본의 Fe:B 비율에 따른 열적 및 자기적 특성 분석

한동영 · 손광호*

국립공주대학교 물리교육과, 충남 공주시 공주대학로 56, 32588

최현경 · 엄영랑

한국원자력연구원 하나로이용부, 대전시 유성구 가정로 989-111, 34057

김성현 · 오현철

울산과학기술원 화학과, 울산시 울주군 언양읍 유니스트길 50, 44919

(2025년 7월 14일 받음, 2025년 8월 19일 최종수정본 받음, 2025년 8월 21일 게재확정)

본 연구에서는 Fe:B 조성을 변화시킨 비정질 합금 리본의 열적 및 자기적 특성을 분석하였다. 시차 주사 열분석(DSC) 결과, 조성에 따라 결정화 온도와 발열 피크의 명확성이 달라졌으며, B 함량이 증가할수록 α -Fe 상 형성과 관련된 첫 번째 피크가 불분명해지는 경향을 보였다. 상온에서 측정한 M-H 곡선 분석을 통해 모든 시료가 낮은 보자력과 빠른 자화 포화를 나타내는 연자성 특성을 유지함을 확인하였다. 그러나 포화자화 및 보자력은 조성 변화에 따른 뚜렷한 경향성을 보이지 않았다. Mössbauer 분광 분석에서는 조성에 따라 국소 자기 구조가 변화함을 확인하였다. 본 연구는 연자성 비정질 재료의 조성 설계와 열처리 조건 설정에 기초 자료를 제공한다.

주제어 : 뫼스바우어 분광기, 연자성 물질, 비정질 합금

I. 서 론

터빈 발전기의 성능 향상은 지속 가능한 에너지 발전 및 효율적인 에너지 활용을 위한 중요한 과제이다. 전력 소비와 물리적 크기를 줄이기 위해서도 변압기와 모터의 에너지 효율을 높여야 한다. 이러한 성능과 효율 향상에 핵심적인 역할을 하는 것은 발전기에 사용되는 영구자석과 연자석의 자기적 특성의 조절이다. 전기 기기의 개발에서 폐기물 감소 및 에너지 절감에 대한 강력한 요구에 따라 연자석 물질로 비정질 및 나노 결정질 합금이 개발되고 있다[1-3]. 비정질 합금은 우수한 연자성, 높은 고강도 및 내식성 등을 나타내어 다양한 곳에 실용화되고 있다[4-6]. 과냉각된 금속 액체의 빠른 담금질로 인해 비정질 합금은 무질서한 원자 구조를 가지며 일반적으로 물리적 및 기계적 특성의 독특한 조합을 나타낸다[7-10]. 그러나, 비정질 합금은 이러한 구조적 무정형성으로 인해 구조 재료로서의 적용을 심각하게 저해하는 상온취성과 같은 까다로운 문제가 발생한다[11,12]. 또한, 현재 주로 사용되는 실리콘 강철 기반 연자석은 몇 가지 내재적인 한계점을 가지고 있다. 높은 코어인 철의 손실로 인해 에너지 변환 효율이 떨어진다[13]. 이를 위해 고온, 고주파 등의 다양한 작동 조건을 견딜 수 있는 우수한 연자성 특성을 가진 소재의 개발이 필요하다[14-16]. 여러 연자성 중에 FINEMET(Fe-Si-B-Nb-Cu)[1] NANOPERM(Fe-Cu-(Zr, Hf, Nb))[2] 등은 코어 손실이 낮을 뿐 아니라 포화자속 밀도가 높다. Si를 대체하기 위하여 Nb 과 같은 내화 원소를 사용하여 철 손실이 적당하고 포화자속 밀도를 높아졌다[17].

본 연구에서 비정질 $\text{Fe}_{93-x}\text{Nb}_7\text{B}_x$ ($x = 2, 16, 18, 29$) 합금 리본의 열적 안정성 및 자기적 특성에 미치는 영향을 체계적으로 분석하고자 하였다. 이를 위해 다양한 B 함량을 갖는 시료를 제작하였으며, 시차 주사 열분석(DSC)을 통해 결정화 거동을 조사하고, 상온 M-H 및 B-H 곡선을 통해 연자성 특성을 평가하였다. 또한, 국소 자성 환경과 상 구조를 보다 정밀하게 분석하기 위해 Mössbauer 분광 분석을 수행하였다.

조성 변화가 열처리 윈도우에 어떤 영향을 미치는지를 확인하고, 열적 안정성과 자기적 응답 특성 간의 상관관계를 규명하는 데 중점을 두었다. 본 연구는 연자성 재료의 성능을 향상시키기 위한 조성 설계 및 열처리 조건의 최적화를 위한 기초자료를 제공하며, 나노결정 연자성 재료의 이해와 응용 확대에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

II. 실험 방법

이 연구에서 사용한 $\text{Fe}_{93-x}\text{Nb}_7\text{B}_x$ ($x = 2, 16, 18, 29$) 비

정질 리본 샘플은 합금을 단롤 용융 방사법(Melt Spun)을 이용하여 제작하였다. x 는 B의 함량(at%)을 나타낸다. 제작된 리본은 20 μm 두께에 2 mm의 폭을 가진다. 본 연구팀에서 보고한 논문의 X-선 회절 무늬에서 비정질 형성을 알 수 있다[18]. 제작된 비정질 합금 리본의 특성은 시차 주사 열분석(Differential Scanning Calorimetry, DSC), 물리적 특성 측정 시스템-Vibrating Sample Measurement, PPMS-VSM), 뫼스바우어 분광기(Mössbauer spectroscopy)로 측정하고 MossWinn 프로그램을 사용하여 최소자승법(least-squares fitting)으로 분석하여 비교 평가하였다.

III. 결과 및 고찰

$\text{Fe}_{93-x}\text{Nb}_7\text{B}_x$ 비정질 리본의 열적 안정성과 결정화 거동을 확인하기 위하여 시차 주사 열분석을 수행하였으며, 그 결과를 Fig. 1에 제시하였다. 모든 조성에서 두 개의 발열 피크가 관찰되었으며, 이는 적어도 두 단계 이상의 상 변화가 존재함을 나타낸다. 일반적으로 첫 번째 발열 피크(T_{x1})는 α -Fe 나노결정 상의 형성과 연관되며, 두 번째 피크(T_{x2})는 Fe_3B 등의 경자성 상의 형성과 관련된다. DSC 결과에서 조성이 $\text{Fe}_{91}\text{Nb}_7\text{B}_2$ 에서 $\text{Fe}_{64}\text{Nb}_7\text{B}_{29}$ 로 변화함에 따라, 즉 B 함량이 증가함에 따라 T_{x1} 은 105°C에서 240°C까지, T_{x2} 는 153°C에서 320°C까지 점진적으로 증가하며, 결정화 온도 간격 $\Delta T(= T_{x2} - T_{x1})$ 도 48°C에서 80°C까지 넓어지는 경향을 보인다는 것이다. 이는 B 원소의 첨가가 비정질 구조의 열적 안정성을 높이며, 결정화 반응을 지연시키는 역할을 한다. 그러나 α -Fe 상 형성과 관련된 첫 번째 발열 피크(T_{x1})의 명확성은 조성에 따라 뚜렷한 차이를 보였다. $\text{Fe}_{91}\text{Nb}_7\text{B}_2$ 시료에서는 첫 번째

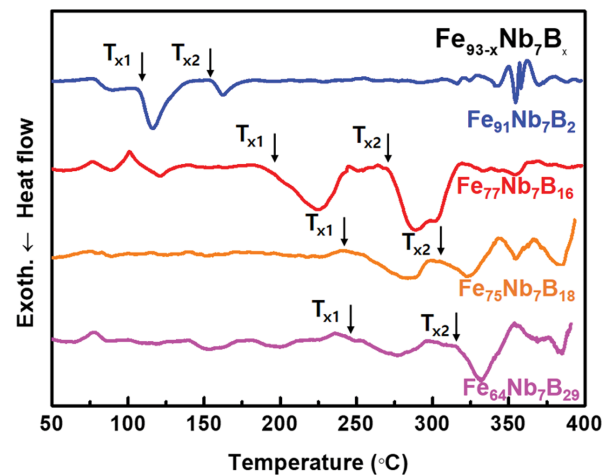


Fig. 1. (Color online) DSC curves of $\text{Fe}_{93-x}\text{Nb}_7\text{B}_x$ ($x = 2, 16, 18$, and 29) amorphous alloy ribbons.

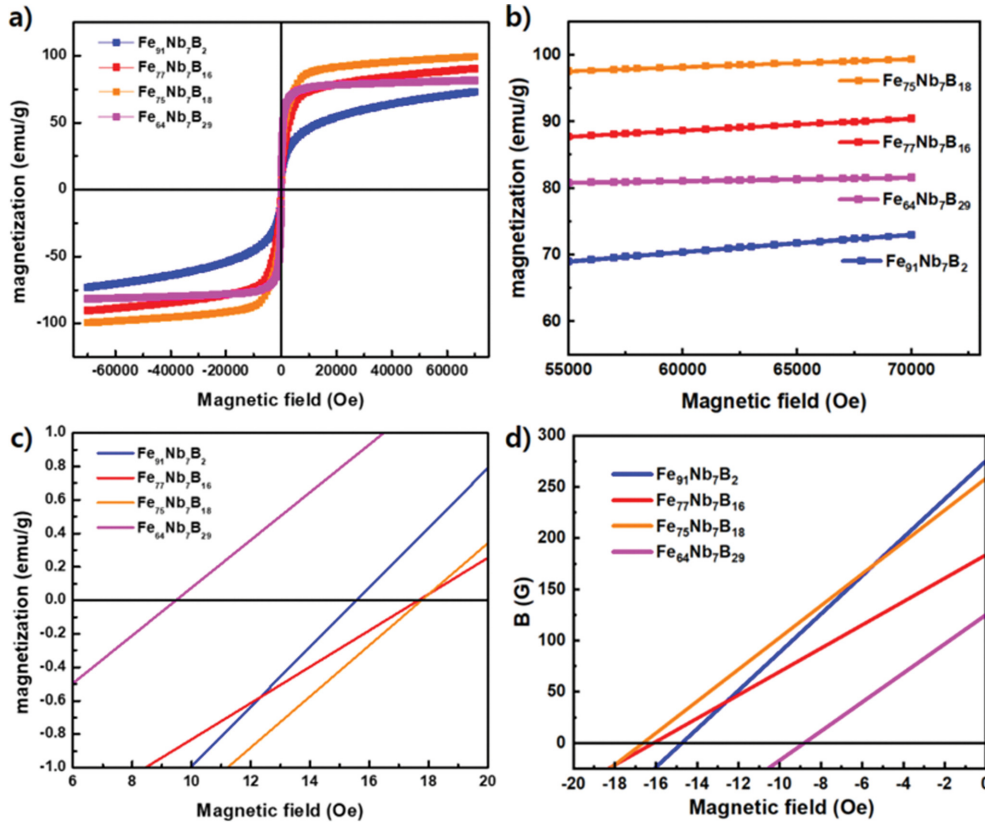


Fig. 2. (Color online) a) field dependent magnetization curves (M-H curves) of $\text{Fe}_{93-x}\text{Nb}_7\text{B}_x$ ($x = 2, 16, 18$, and 29) amorphous alloy ribbons at 300 K, b) the Saturation magnetization part, and c) the coercive fields part, measured by PPMS-VSM and d) B-H curves.

잘 구분되었으나, 그 이상의 B 함량을 갖는 $\text{Fe}_{75}\text{Nb}_7\text{B}_{18}$ 및 $\text{Fe}_{64}\text{Nb}_7\text{B}_{29}$ 시료에서는 피크의 분해능이 현저히 떨어지는 경향을 보였다. 이는 $\alpha\text{-Fe}$ 상의 형성 반응이 점차 억제되거나 비정질 구조 내에서 분산적인 형태로 진행되고 있음을 알 수 있다.

비정질 $\text{Fe}_{93-x}\text{Nb}_7\text{B}_x$ 리본의 자기적 특성을 평가하기 위하여 상온에서 측정된 M-H 곡선을 Fig. 2 a)~c)에 나타내었다. 측정은 최대 ± 70 kOe의 외부 자기장을 가해 수행하였으며, 이를 통해 시료의 포화자화(M_s) 및 보자력(H_c)을 비교하였다. 모든 시료에서 히스테리시스 루프가 좁고 자화 포화가 빠르게 일어나는 전형적인 연자성 특성을 확인할 수 있다.

포화자화값은 시료에 따라 약 70~125 emu/g의 범위로 분포하였으며, 조성 변화에 따른 명확한 경향성은 관찰되지 않는다. 이는 Fe:B 함량의 조성보다는, 결정구조 및 나노상 분율, 내부 응력 등의 복합적 요인이 동시에 작용하기 때문으로 해석된다. 보자력 역시 모든 시료에서 20 Oe 이하의 낮은 값을 보여주었으며, 이는 비정질 기반 연자성 재료로서 매우 우수한 자기적 특성으로 나타난다. 이 또한, 나노결정의 형성 및 비정질 구조의 무방향성(anisotropy-free) 특성에 의한 것으로 해석된다. 한편, Fig. 2 d)는 동일한 시료에 대해

측정된 B-H 곡선으로, 자속밀도(B)와 외부자기장(H) 간의 관계를 나타낸다. 연자성 재료의 경우 초기 투자율이 높고, 외부 자기장의 변화에 빠르게 응답하는 특성이 요구되는데, 본 시료들은 모두 포화까지의 경사가 가파르며 낮은 H에서도 빠르게 자속이 증가하는 곡선을 보여준다.

$\text{Fe}_{93-x}\text{Nb}_7\text{B}_x$ 비정질 리본의 국소 자기 구조 및 전자 환경을 정밀하게 분석하기 위해 Mössbauer 분광 실험을 수행하였다. 측정은 상온에서 이루어졌으며, 그 결과를 Fig. 3 및 Table I에 각각 제시하였다. 스펙트럼 분석을 통해 각 조성에 존재하는 Fe 원자의 자기적 상태 및 화학적 환경을 정량적으로 확인하였다. $\text{Fe}_{91}\text{Nb}_7\text{B}_2$ 시료의 Mössbauer 스펙트럼은 더블렛(doublet)과 싱글렛(singlet)으로 구성된 비자성적 피팅 결과를 보였으며, 이는 시료 내 Fe 원자 대부분이 비정질 상태의 비자성 환경에 존재함을 시사한다(Fig. 3 a)). 구체적으로, 더블렛 성분은 $QS = 0.39$ mm/s, $IS = 0.04$ mm/s로 분석되었고, 전체 면적의 약 86.98%를 차지하였다. 나머지 13.02%는 $IS = -0.10$ mm/s인 싱글렛으로 분석되었으며, 이는 서로 다른 화학적 환경에 존재하는 Fe 원자들의 존재를 의미한다. 반면, B 함량이 증가한 $\text{Fe}_{77}\text{Nb}_7\text{B}_{16}$ 및 $\text{Fe}_{75}\text{Nb}_7\text{B}_{18}$, $\text{Fe}_{64}\text{Nb}_7\text{B}_{29}$ 시료에서는 명확한 자기적 섹스텝(sextet) 구조가

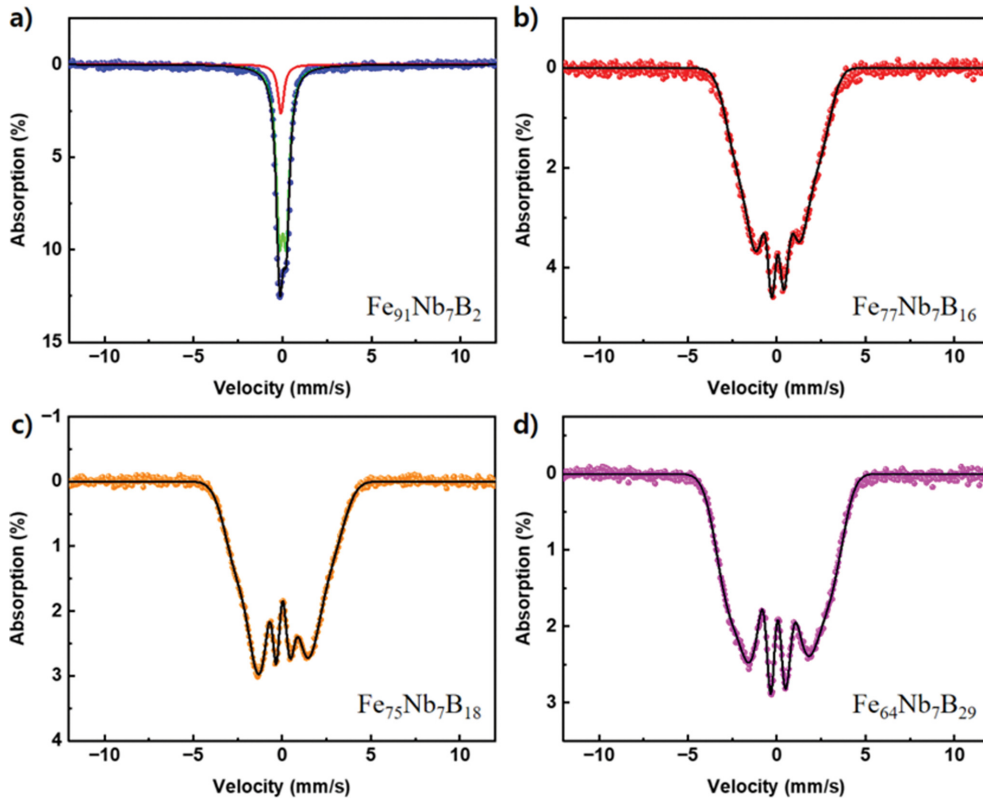


Fig. 3. (Color online) Mössbauer spectra for a) $\text{Fe}_{91}\text{Nb}_7\text{B}_2$, b) $\text{Fe}_{77}\text{Nb}_7\text{B}_{16}$, c) $\text{Fe}_{75}\text{Nb}_7\text{B}_{18}$, and d) $\text{Fe}_{64}\text{Nb}_7\text{B}_{29}$ amorphous ribbons.

Table I. Mössbauer parameters of a) $\text{Fe}_{91}\text{Nb}_7\text{B}_2$, b) $\text{Fe}_{77}\text{Nb}_7\text{B}_{16}$, c) $\text{Fe}_{75}\text{Nb}_7\text{B}_{18}$, and d) $\text{Fe}_{64}\text{Nb}_7\text{B}_{29}$ amorphous ribbons.

Sample		Amorphous			
		Hhf (kOe)	QS (mm/s)	IS (mm/s)	A(%)
$\text{Fe}_{91}\text{Nb}_7\text{B}_2$	Doublet	-	0.39	0.04	86.98
	Singlet	-	-	-0.10	13.02
$\text{Fe}_{77}\text{Nb}_7\text{B}_{16}$		145.2	0	0.01	100
$\text{Fe}_{75}\text{Nb}_7\text{B}_{18}$		167.0	0	0.01	100
$\text{Fe}_{64}\text{Nb}_7\text{B}_{29}$		183.6	0	0.04	100

관찰되었으며, 이는 강자성적인 환경에서의 Fe 원자의 존재를 나타낸다(Fig. 3 b)~d)). 그리고 실험과정에서의 미세한 보정 한계가 복합적으로 작용한 결과로 해석된다. 따라서, 평균 초미세 자기장(Hhf) 값은 이러한 비대칭성을 고려하여 피팅 과정을 통해 도출 되었다. 각 조성에서의 평균 초미세 자기장(Hhf)은 각각 145.2 kOe, 167.0 kOe, 183.6 kOe로 증가하는 경향을 보였으며, 이는 B 함량 증가에 따른 Fe-Fe 교환 상호작용의 강화 및 국소 자기장의 증대를 의미한다. 또한 이들 시료는 QS = 0, IS는 0.01~0.04 mm/s의 범위에 있으며, 피팅 면적은 모두 100%로 나타나 시료 전체가 자성 환경에 놓여 있음을 확인할 수 있다. 이러한 결과는 B 함량 증가가 비정질 구조 내 Fe 원자의 자기적 정렬을 강화하고,

평균 자기장을 증가시키며, 전체적인 자성 상의 비율을 높인다는 것을 의미한다. 전반적으로 Mössbauer 분광 결과는 앞선 자기장-자화(M-H) 측정 결과와 일관된 경향을 보였으나, $x=2$ 조성에서는 M-H 곡선에서 약한 자기적 거동이 나타난 반면, Mössbauer 분광 결과에서는 싱글렛과 더블렛만 관찰되었다. 이는 초미세 시간 스케일에서의 빠른 스핀 요동으로 인해 국소 자기장이 평균화된 결과로 해석될 수 있다. 또한, $x=2$ 의 큐리온도는 약 300 K으로 Mössbauer를 측정할 온도대와 큰 차이가 없다[18]. 이는 비정질 시료의 조성에 따라 국소 자기적 특성이 정밀하게 조절될 수 있음을 보여준다.

IV. 결 론

본 연구에서는 Fe-Nb-B 비정질 리본의 조성 변화에 따른 열적 및 자기적 특성을 정밀 분석하고, 이들의 상관관계를 고찰하였다. 시차 주사 열분석 결과, 조성 변화는 결정화 반응의 온도 및 안정성에 영향을 주며, 특히 특정 조성에서는 결정화 피크의 명확성이 유지되었으나, B 함량이 증가할수록 해당 반응의 명확성이 감소하는 경향이 나타났다. 이는 조성에 따라 α -Fe 상의 형성이 억제되거나 불분명하게 진행될 가능성을 시사하며, 단순한 DSC 결과 해석만으로 상 형성을 단

정짓기는 어렵다는 점을 보여준다.

자기적 특성 측정에서는 모든 시료에서 전형적인 연자성 거동이 관찰되었고, 자화 및 보자력 특성은 전체적으로 우수한 특성을 유지하였다. 그러나 조성 변화에 따라 이러한 특성이 일정한 경향성을 보이지는 않았으며, 이는 자성 특성에 영향을 미치는 요인이 복잡적임을 시사한다. 또한, 자속밀도-자기장(B-H) 곡선 분석을 통해 높은 투자율과 낮은 자기 손실 특성을 확인하였으며, 이는 해당 시료들이 연자성 재료로서 응용 가능성이 높음을 의미한다.

이러한 열적·자기적 분석 결과를 기반으로, 이후 수행한 피스바우어 분광 분석에서는 각 조성에 따라 형성되는 자성 상과 국소 자기 환경의 차이를 보다 정밀하게 검토하였다. 이 결과는 조성에 따른 결정 구조와 자기 특성의 복합적 연관성을 이해하는 데 중요한 근거가 되며, 연자성 재료 설계에 있어 조성 제어와 열처리 조건의 정밀한 최적화가 필요함을 시사한다.

감사의 글

이 논문은 2023년도 과학기술정보통신부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(연구번호 RS-2023-00278491).

이 논문은 2025년도 과학기술정보통신부의 재원으로 과학기술사업화진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(연구번호 2710084650).

References

- [1] Y. a. Yoshizawa, S. Oguma, and K. Yamauchi, *J. Appl. Phys.* **64**, 6044 (1988).
- [2] K. Suzuki, N. Kataoka, A. Inoue, A. Makino, and T. Masumoto, *Mater. Trans. JIM* **31**, 743 (1990).
- [3] M. A. Willard, D. E. Laughlin, M. E. McHenry, D. Thoma, K. Sickafus, J. O. Cross, and V. G. Harris, *J. Appl. Phys.* **84**, 6377 (1998).
- [4] W. Klement, R. H. Willens, and P. Duwez, *Nature* **187**, 869 (1960).
- [5] A. Inoue, *Acta Mater* **48**, 279 (2000).
- [6] T. C. Hufnagel, C. A. Schuh, and M. L. Falk, *Acta Mater.* **109**, 375 (2016).
- [7] A. Inoue and A. Takeuchi, *Acta Mater.* **59**, 2243 (2011).
- [8] Y. Q. Cheng and E. Ma, *Prog. Mater. Sci.* **56**, 379 (2011).
- [9] W. H. Wang, *Prog. Mater. Sci.* **57**, 487 (2012).
- [10] B. A. Sun and W. H. Wang, *Prog. Mater. Sci.* **74**, 211 (2015).
- [11] J. W. Qiao, H. L. Jia, and P. K. Liaw, *Mater. Sci. Eng. R-Rep.* **100**, 1 (2016).
- [12] Z. F. Zhang, J. Eckert, and L. Schultz, *Acta Mater.* **51**, 1167 (2003).
- [13] Y. Enomoto, K. Deguchi, and T. Imagawa, *IEEE J. Ind. Appl.* **9**, 102 (2020).
- [14] P. Jia, E. Wang, and E. K. Han, *Materials* **9**, 899 (2016).
- [15] M. A. Willard, M. Daniil, and K. E. Knipping, *Scr. Mater.* **67**, 554 (2012).
- [16] O. Gutfleisch, M. A. Willard, E. Bruck, C. H. Chen, S. G. Sankar, and J. P. Liu, *Adv. Mater.* **23**, 82 (2011).
- [17] M. I. Oshtrakh, Z. Klencsár, V. A. Semionkin, E. Kuzmann, Z. Homonnay, and L. K. Varga, *Mater. Chem. Phys.* **180**, 66 (2016).
- [18] D. Han, S. Kim, H. Lee, H. Oh, and K. Son, *SSRN* 5074128 (2024).