

식스 시그마 기법을 활용한 고밀도 정보저장 매체 개발

이명복
광주대학교 기계·금형공학부 교수

Development of High-Density Information Storage Media by Employing the Six Sigma Methodology

Myung-Bok Lee

Professor, Division of Mechanical and Metallic Mold Engineering, Gwangju University

요 약 식스 시그마 기법은 제품과 서비스의 품질관리와 원가 절감을 통한 생산성 향상 뿐만 아니라, 연구개발을 비롯한 기업 경영의 다양한 영역에 적용할 수 있는 관리 기법이다. 또한 정보 융합 시대의 실현을 위하여 고밀도 정보저장 매체 및 장치의 개발은 필수적 요건이다. 본 논문에서는 고밀도 정보저장 매체 개발 과제에 식스 시그마 방법론과 기법을 적용한 사례에 대하여 보고하고자 한다. 식스 시그마 프로세스는 표준적으로 사용되는 DMAIC 프로세스를 적용하였으며 각 단계별로 달성하고자 하는 목표와 적용한 도구 및 결과에 대하여 상세히 설명하였다. 본 기법을 활용함으로써 250 Gb/in² 이상의 높은 기록밀도를 갖는 정보저장 매체를 균일하고 재현성 있게 형성할 수 있는 제조 방법을 확립하였으며, 제조된 매체의 자기적 특성과 성능을 자기이력곡선을 통하여 확인하였다.

주제어 : 식스 시그마, 정보 융합, 정보저장 매체, 자기기록

Abstract Six sigma methodology is the management tools not only can cause productivity enhancement through the quality control and cost reduction of products and services but also can be applied to various activities of corporates such as research and development. Development of high-density information storage media and devices is indispensable to accomplish the information convergence era. In this paper, we report the case of applying six sigma methodology and tools to the development project of high-density information storage media. The standard DMAIC process was applied to the project and pursuing goals and tools and results in each stage were explained in detail. By adopting the methodology, we could establish fabrication methods of information storage media of recording density higher than 250 Gb/in² with high uniformity and reproducibility. The magnetic property and performance of fabricated media were confirmed through measurement of the magnetic hysteresis curve.

Key Words : Six sigma, Information convergence, Information storage media, Magnetic recording

1. 서론

식스 시그마 설계를 위한 방법론은 기업의 경영 활동 전반에서 자원의 낭비를 최소화하고 생산성의 극대화를 통하여 궁극적으로 고객 만족이란 목표를 달성하기 위한

활동이라고 할 수 있다[1,2]. 또한 식스 시그마 설계 방법론은 경영 활동의 개선을 위한 다양한 기법과 도구를 기업에 도입함으로써 기업의 핵심 역량을 지속적으로 향상시킬 수 있는 접근 방법이다. 미국의 Motorola사에서 1987년에 식스 시그마 방법론이 처음으로 도입된 이래,

This study is supported by 2016 Research Grant from Gwangju University.

이 연구는 2016년도 광주대학교 대학 연구비의 지원을 받아 수행되었음.

*Corresponding Author : Myung-Bok Lee (mblee3@gwangju.ac.kr)

Received June 30, 2018

Accepted August 10, 2018

Revised August 2, 2018

Published September 28, 2018

수 많은 글로벌 기업에서 이 방법론을 적용하여 제품과 서비스의 품질 개선, 생산성 향상 및 비용 절감 등 다양한 측면에서 기업 경영의 개선 및 실제 재무적인 수익을 얻을 수 있었다[3]. 식스 시그마란 용어에서 시그마란 표준편차를 의미하며, 식스 시그마란 통계적으로 백만 개의 제품 중 3.4 개의 결함이 발생하는 프로세스로 극히 높은 품질 수준을 의미한다. 제품이나 서비스의 품질은 설계 품질, 제조(생산) 품질, 사용 품질로 나눌 수 있다. 제품이나 서비스의 품질과 관련하여 발생하는 비용인 품질 비용은 예방 1이라면, 검사 10, 실패는 100에 이른다[4]. 따라서, 설계 품질을 관리하는 것이 무엇보다 중요하며 이러한 측면에서 연구개발 단계로부터 식스 시그마 방법론을 적용하는 것이 필요하다고 할 수 있다. 연구개발 단계에서 식스 시그마를 적용한다는 것은, 고객의 요구사항을 정확히 파악하고 고객이 요구하는 조건을 제품의 주요 사양과 성능으로 변환시키며 이를 실제 생산이 가능한 제품의 설계로 전개하는 것을 의미한다. 이는 처음부터 올바른 목표를 정하고 이를 올바른 방법으로 수행하는 철학과 상통한다.

한편, 4차 산업혁명으로 일컬어지는 지능정보 융합 시대에 있어서 대용량 정보저장 매체와 장치의 개발은 필수 불가결한 요소라 할 수 있다. 본 논문에서는 차세대 고밀도 정보저장 매체로 주목받고 있는 패턴드 자기 미디어 개발을 위한 식스 시그마 방법론 적용 사례에 대하여 보고하고자 한다. 식스 시그마 프로세스는 표준적으로 사용되고 있는 Define-Measure-Analyze-Improve-Control, 즉 DMAIC 프로세스를 적용하였으며[5], 각 단계별로 달성하고자 하는 목표와 적용한 도구 및 결과에 대하여 설명하였다. 본 기법을 활용함으로써 250 Gb/in² 이상의 높은 기록밀도를 갖는 정보저장 매체를 균일하고 재현성 있게 형성할 수 있는 제조 방법을 확립하였으며, 정보저장 매체 즉 자기기록 매체의 자기이력곡선의 측정을 통하여 제작된 매체의 자기적 특성과 성능을 확인하였다.

2. 연구 및 실험방법

2.1 식스 시그마 설계 방법론

식스 시그마 프로세스는 여러 가지가 있는데 본 논문에서는 표준적으로 사용되는 DMAIC 프로세스를 적용하였다. DMAIC 프로세스는 여러 제조 및 서비스 기업에서

품질 개선을 위하여 성공적으로 활용된 바 있으며 연구개발 분야에서도 적용 가능한 프로세스이다[6,7]. 각 단계별로 달성하고자 하는 목표와 적용한 도구 및 방법들을 Table 1에 나타내었다.

Table 1. DMAIC process employed in this project

Stage	Goal	Tool
Define	· Define customers and find their needs · Select and plan the project	· CTQ · VOC
Measure	· Understand present level · Establish improvement goal	· MSA
Analyze	· Select the potential factors · Draw the vital few X's	· Process mapping · C&E matrix
Improve	· Draw the improvement plan · Verify the improvement results	· DOE · FMEA
Control	· Make the future control plan · Standardize the results	· Control chart · Check list

2.2 실험 방법

고밀도 자기기록 매체인 패턴드 미디어를 제작하기 위해 2.5인치 glass 기판 위에 DC 마그네트론 스퍼터링 장치를 이용하여 Ta과 Ru 박막을 연속적으로 증착하였다. 이 때 Ta층은 SiO₂ 층과 Ru층과의 밀착력 향상을 위해, Ru는 자성재료인 Co-Pt 합금의 전해도금 시에 통전을 위한 seed 층으로 사용하였다. 그 후 전해도금을 이용하여 자성 dot 패턴을 형성하기 위해 seed 층이 증착된 기판 위에 50 nm의 주기와 30 nm의 직경을 갖는 hole 패턴 어레이를 나노임프린트 공정을 이용하여 제작하였다.

나노임프린트 공정을 위한 몰드는 전자빔 리소그래피를 사용하여 직경 30 nm의 pillar가 형성된 quartz stamp를 제작하였다. 상기와 같은 방법으로 준비된 Ru/Ta/glass 기판 위에 스핀 코팅으로 액상의 고분자 resin을 도포하고 상기 stamp를 가압한 후 UV를 1분간 조사하여 curing시킨 후에 stamp를 분리하여 hole 패턴을 형성하였다. Hole 패턴 하부의 잔류 resin 층은 O₂ 가스를 이용한 plasma ashing으로 제거하였다. 나노임프린트 공정에 의하여 hole 패턴을 제작한 후에 전해도금으로 Co-Pt 합금을 충전하여 자성 dot 패턴을 제작하였다. 전해액으로는 dinitro-diamine Pt [Pt(NO₂)₂(NH₃)₂]와 Co sulphamic acid [Co(NH₂SO₃)₂]를 사용하였고 첨가제로 sodium hypophosphite, sodium hydroxide 등을 사용하였다[8]. 실험계획법을 이용하여 전해액의 농도, 온도,

pH 등의 적정 실험조건을 결정하였다.

제작된 패턴드 미디어는 주사전자현미경(Scanning Electron Microscopy, SEM) 및 X선회절장치(X-ray Diffractometer, XRD)를 이용하여 각각 형상 및 결정구조 분석을 진행하였고, 초전도양자간섭소자(Superconducting Quantum Interference Device, SQUID) 자력계를 이용한 자기이력곡선에 의하여 자기적 특성을 평가하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 Define 단계

Table 1에 나타낸 바와 같이 define 단계의 목표는 고객을 정의하고 고객의 소리(Voice of customers, VOC)를 상세히 듣고 고객의 요구를 명확히 파악하는 것이다. 아울러 문제를 정의하고 식스 시그마에 의하여 문제를 해결하기 위한 프로젝트를 선정하는 단계이다. 최근 지능정보화 사회의 도래로 인한 정보량의 급격한 증가로 보다 고밀도로 데이터를 기록 및 재생할 수 있는 정보저장 매체가 요구되고 있다. 특히, 자기기록 매체는 대용량 이면서 고속 액세스가 가능하다는 특성으로 인해, 컴퓨터 뿐만 아니라 각종 디지털 기기의 정보기억장치로서 주목받고 있다. 자기기록 매체의 고밀도화를 위해서는 기록된 비트의 크기를 줄여야 하나, 기존의 작은 결정립들의 집합체로 한 비트가 구성되는 경우 비트 크기가 어느 한계 이상으로 감소하게 되면, bit transition noise가 증가하고 신호 대 잡음비(SNR)가 감소하게 되는 문제가 있다. 따라서, 나노 크기의 자성 dot를 미리 물리적으로 격리하여 기록 비트를 개별적인 하나 하나의 dot 패턴으로 제작하는 패턴드 미디어의 필요성이 대두되고 있으며, 이 미디어는 고밀도화에 따른 낮은 SNR에 대한 문제점을 극복하고 저장용량을 증대할 수 있는 장점이 있다 [9,10]. 또한 상기 dot 크기가 작아지고 고기록밀도로 형성할 경우, 열적 안정성에 문제가 발생하므로 상기 dot를 자기이방성 에너지가 큰 물질로 형성할 수 있는 기술이 필요하다.

이상에서, 자기 정보저장 매체의 품질에 영향을 미치는 핵심 성능지표(Critical to quality, CTQ)는 자성 물질 dot의 크기와 균일성, 자기이방성 에너지 등을 들 수 있다. 따라서, 본 식스 시그마 과제에 목표는 높은 자기이방성 에너지를 가지며 수십 nm의 크기를 갖는 자성 dot를

균일하고 안정성 있게 제작할 수 있는 기술을 개발하는 것이다.

3.2 Measure 단계

본 단계에서는 현재의 기술 수준을 측정과 평가를 통하여 정확히 파악하고 고객이 요구하는 성능 수준과 현 수준의 갭을 분석하여 목표에 도달하기 위한 개선 목표를 수립한다. 현상의 분석을 위해 사용하는 데이터의 정확성을 확보하기 위해 측정 시스템 분석(Measurement system analysis, MSA)을 수행한다. MSA란 측정 도구, 작업자, 측정 방법, 측정 환경 등 측정의 전체 과정을 평가하여 데이터의 재현성과 반복성을 얻고자 하는 것이다.

본 과제에서는 기존 자기기록 매체인 수직자기기록 박막의 개량이 아니라, 새로운 제작 방법인 나노 임프린트와 전해도금을 이용하여 고밀도의 패턴드 미디어를 개발하기로 하였다. 문헌 조사를 통하여 패턴드 미디어의 기술 동향을 파악하였으며[9-12], 분석 장비들의 MSA를 통하여 측정 결과에 충분히 신뢰성을 가질 수 있음을 확인하였다.

3.3 Analyze 단계

본 단계에서는 프로세스 맵핑에 따른 특성요인도 작성을 통하여 제품이나 서비스에 영향을 미치는 잠재 인자들을 도출한다. 또한, 원인-결과 매트릭스 (Cause & effect matrix) 분석을 통하여 가설을 세우고 가설을 검증하여 여러 잠재 인자들 중에서 핵심 인자들을 도출한다. Fig. 1에 본 과제의 패턴드 미디어 제작을 위한 전체 공정과 결과에 영향을 미칠 수 있는 잠재 인자들을 프로세스 맵핑 기법에 의하여 나열하였다.

전체 공정 순서는 전자빔 리소그래피와 반응성 이온 식각(Reactive ion etching, RIE)으로 이루어지는 마스터

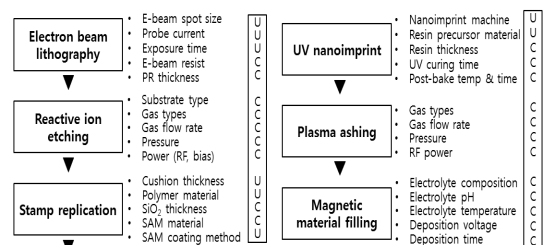


Fig. 1. Process mapping for the fabrication of patterned media (c: controllable parameter, u: uncontrollable parameter).

No.		1	2	3	4	5	Total Score
Rating of Importance to Customer		7	10	8	6	4	
Process Step	Process Output	Magnetization	Coercive Field	Squareness	Filling Defect	Aspect Ratio	
	Process Input						
Magnetic Material Filling	SUL * Material	1	3	9	1	1	119
	Electrolyte Type	3	3	3	1	1	85
	Electrolyte Composition	3	3	1	3	1	81
	Electrolyte pH	9	9	9	1	1	235
	Electrolyte Temperature	3	9	9	3	3	213
	Additive Chemical	1	3	1	3	3	75
	Deposition Voltage	9	9	9	3	9	279
	Deposition Time	9	3	3	3	3	147

Fig. 2. Cause and effect matrix for the magnetic material filling process (*SUL : soft magnetic underlayer).

패턴 제작, soft mold인 스탬프 복제[13,14], UV 나노임프린트, 플라즈마 애싱에 의한 잔류 레진층의 제거, 자성재료 층의 순으로 진행된다. Fig. 2에 패턴드 미디어의 자기적 특성을 결정하는 가장 중요한 공정인 자성재료 충전 공정에서 잠재 인자들과 미디어 특성 간의 상호 관련성을 보여 주는 원인-결과 매트릭스(Cause & effect matrix)를 작성하였다. 그림으로부터 미디어 특성에 가장 큰 영향을 미치는 핵심 인자(vital few X's)는 중요도 순으로 도금 전압, 전해액 pH, 전해액 온도 등을 알 수 있다.

3.4 Improve 단계

본 단계에서는 앞에서 얻은 핵심 인자에 대하여 실험 계획법(Design of experiment, DOE)을 통하여 제조 공정의 최적 조건을 도출한다.

도금 전압, 전해액 pH, 전해액 온도의 3인자와 2수준을 사용한 완전요인설계를 시행하였고 반응인자(Y)로는 자성 dot의 형상과 보자력을 선정하여 실험하였다. 이 때 음극은 나노임프린트에 의해 제작된 홀 어레이 패턴이 형성되어 있는 Ru(20 nm)/Ta(5 nm)/Glass 기판, 양극은 Pt mesh를 사용하였고 도금 시간은 60초로 고정하였다. Fig. 3에 주인자와 교호인자들에 대한 95% 신뢰도 수준에서 유의미한 순서에 따른 파레토 차트를 나타내었다. 예상한 바와 같이 도금 전압과 전해액의 pH가 자기적 특성에 가장 큰 영향을 미침을 알 수 있었다. DOE를 통하

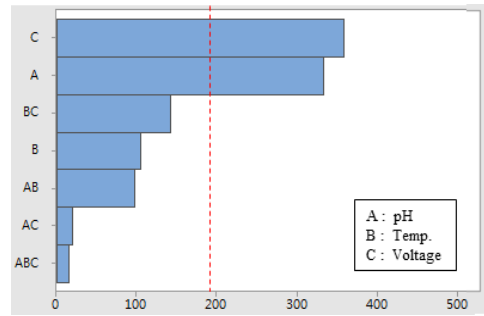


Fig. 3. Pareto chart of the output response to the input factors when reliability level is 95%. Factors exceeding red dot line can be said to be meaningful.

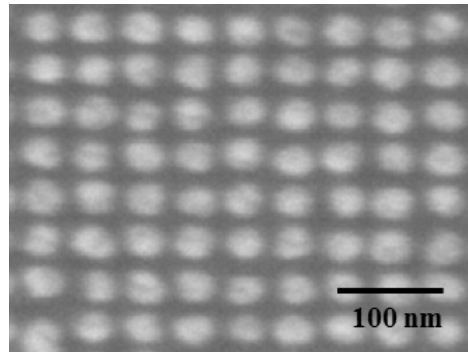


Fig. 4. SEM image of the fabricated patterned magnetic recording media.

여 구한 최적 조건인 전해액의 pH 9.0, 전해액 온도 70°C, 도금 전압 1.6V, 도금 시간 60초의 실험 조건에서 얻어진 자성 dot 어레이의 SEM 사진을 Fig.4에 나타내었다. 직경 30 nm, 주기 50 nm의 CoPt 합금의 자성 dot 어레이가 균일하게 형성되었음을 볼 수 있다. 이 자성 dot 어레이에 대하여 SQUID 자력계를 사용하여 인가된 자계에 따른 자화량 변화를 나타내는 M-H 이력 곡선을 측정하였다. 그림에서 종축은 인가 자계에 따른 자화량을 포화자화량으로 normalize한 값을 나타낸다. 기판에 수직 방향과 수평 방향으로 자계를 인가한 두 곡선을 비교해 볼 때, 본 CoPt 자성 dot 어레이는 기판에 수직 방향으로 자기모멘트를 갖는 수직자기이방성을 가짐을 알 수 있으며, 기판에 수직인 방향으로 각형비(Mr/Ms) 0.6, 보자력 2230 Oe의 자기적 특성을 나타내었다. 이는 SUL 하층인 (001) 방향으로 성장된 Ru 박막의 영향에 따라 HCP 결정구조를 갖는 CoPt 자성 dot의 C축이 기판에 수직인 방향으로 성장하였기 때문으로 생각된다[15].

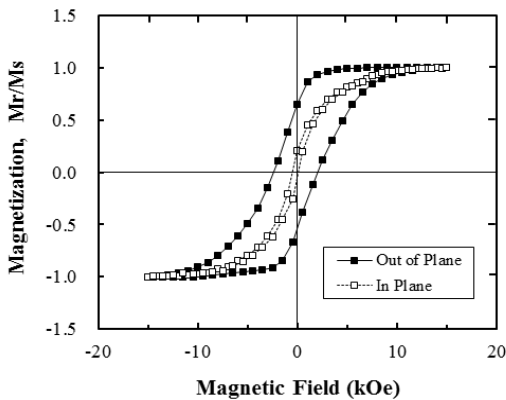


Fig. 5. Magnetic hysteresis curve CoPt dot array measured at room temperature.

한편, Yang 등은 나노임프린트와 블록 공중합체의 방향성 자기조립을 결합하여 형성한 template를 이용하여 CoCrPt 자성 박막에 이온 빔 식각으로 20 nm 이하 크기의 나노 패턴을 갖는 패턴드 미디어를 제작하였다[16]. 이와 같이 본 논문에서도 제시한 나노임프린트의 대면적화 기술과 다양한 물리적, 화학적 나노구조 제작기술을 융합함으로써 차세대 초고밀도 패턴드 미디어를 구현할 수 있을 것으로 생각된다[17].

3.5 Control 단계

Improve 단계에서 도출된 개선 결과에 따라 품질을 개선하고 생산 라인을 지속적으로 관리하기 위한 방안을 도출하고 실행하는 단계이다. 최적 공정조건에 따라 자기적 특성과 같은 주요 특성에 대하여 관리도(Control chart)를 작성하여 품질을 관리한다. 관리도는 데이터의 추이를 나타내는 그래프로서 공정의 관리 상태를 동태적으로 밝혀 주고, 공정 품질의 상태를 통계적으로 판단할 수 있는 관리 한계선이 설정된다. 특성 데이터를 관리도 상에 나타낸 점들이 관리 한계선 내에 있으면 관리상태로 간주하고, 이 점들이 관리 한계선을 이탈하면 특수한 원인에 의한 이상발생으로 보아 공정 조건 등을 관리한다.

또한 본 단계에서는 공정의 핵심 인자 등 주요 관리 항목들을 체크 시트로 작성하여 중점 관리하도록 한다.

4. 결론

차세대 고밀도 자기 정보저장 매체로 주목받고 있는

패턴드 미디어 개발을 위하여 식스 시그마 방법론을 적용하였다. 식스 시그마 프로세스는 일반적으로 사용되고 있는 DMAIC 프로세스를 적용하였으며, 프로젝트의 각 단계별로 달성하고자 하는 목표에 따라 적합한 도구와 방법을 적용하였다. 본 기법을 활용함으로써 직경 30 nm, 주기 50 nm를 갖는 자성 dot 어레이, 즉 250 Gb/in² 이상의 높은 기록밀도에 해당하는 정보저장 매체를 균일하게 형성할 수 있는 제조 방법을 확립할 수 있었다. 제작된 자성 dot 어레이의 자기이력곡선을 측정된 결과, 기판에 수직된 방향으로 각형비 0.6, 보자력 2230 Oe의 자기적 특성을 나타내었으며 수직자기기록 매체로 활용할 수 있는 자기적 성능이 얻어졌다.

REFERENCES

- [1] S. Chowdhury. (2002). Design for Six Sigma: The revolutionary process for achieving extraordinary profits, Prentice Hall, ISBN 9780793152247.
- [2] T. Bertels. (2003). Rath & Strong's Six Sigma Leadership Handbook, John Wiley and Sons, pp. 57-83, ISBN 9780471251248.
- [3] J. Antony & R. Banuelas. (2002). Key ingredients for the effective implementation of Six Sigma program. *Measuring Business Excellence*, 6(4), 20-27. DOI: 10.1108/13683040210451679
- [4] C. R. Superville & S. Gupta. (2001). Issues in modeling, monitoring and managing quality costs. *The TQM Magazine*, 13(6), 419-423.
- [5] J. d. Mast & J. Lokkerbol. (2012). An analysis of the Six Sigma DMAIC method from the perspective of problem solving. *International Journal of Production Economics*, 139(2), 604-614. DOI: 10.1016/j.ijpe.2012.05.035
- [6] T. Hasenkamp & A. Olme. (2008). Introducing Design for Six Sigma at SKF. *International Journal of Six Sigma and Competitive Advantage*, 4(2), 172 - 189. DOI: 10.1504/IJSSCA.2008.020281
- [7] P. Kaushik & D. Khanduja. (2009). Application of Six Sigma DMAIC methodology in thermal power plants: A case study. *Total Quality Management & Business Excellence*, 20(2), 197-207. DOI: 10.1080/14783360802622995
- [8] I. Zana, G. Zangari, & M. Shamsuzzoha. (2005). Enhancing the perpendicular magnetic anisotropy of Co-Pt(P) films by epitaxial electrodeposition onto

- Cu(111) substrates. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 292, 266-280.
DOI: 10.1016/j.jmmm.2004.11.141
- [9] B. D. Terris. (2009). Fabrication challenges for patterned recording media. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 321(6), 512-517.
DOI: 10.1016/j.jmmm.2008.05.046
- [10] R. Ruiz, E. Dobisz & T. R. Albrecht. (2011). Rectangular patterns using block copolymer directed assembly for high bit aspect ratio patterned media. *ACS Nano*, 5(1), 79-84.
DOI: 10.1021/nn101561p
- [11] C. A. Ross. (2001). Patterned magnetic recording media. *Annual Review of Materials Research*, 31, 203-235.
DOI: 10.1146/annurev.matsci.31.1.203
- [12] T. Ouchi, Y. Arikawa & T. Homma. (2008). Fabrication of CoPt magnetic nanodot arrays by electrodeposition process. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 320(22), 3104-3107.
DOI: 10.1016/j.jmmm.2008.08.022
- [13] D. H. Lee, E. H. Cho, H. S. Kim, B. K. Lee, M. B. Lee, J. S. Sohn, C. H. Lee & S. J. Suh. (2008). Multilayer soft mold for UV imprinting the 50 nm pitch dot array. *Journal of Vacuum Science and Technology B*, 26(2), 514-517.
DOI: 10.1116/1.2839880
- [14] G. M. McClelland, M. W. Hart, C. T. Rettner, M. E. Best, K. R. Carter & B. D. Terris. (2002). Nanoscale patterning of magnetic islands by imprint lithography using a flexible mold. *Applied Physics Letters*, 81, 1483-1485.
DOI: 10.1063/1.1501763
- [15] A. I. Gapin, X. R. Ye, J. F. Aubuchon, L. H. Chen, Y. J. Tang & S. Jin. (2006). CoPt patterned media in anodized aluminum oxide templates. *Journal of Applied Physics*, 99(8), 08G902.
DOI: 10.1063/1.2163289
- [16] X. Yang, S. Xiao, W. Hu, J. Hwu, R. Veerdonk, K. Wago, K. Lee & D. Kuo. (2014). Integration of nanoimprint lithography with block copolymer directed self-assembly for fabrication of a sub-20 nm template for bit-patterned media. *Nanotechnology*, 25(39), 395301.
DOI: 10.1088/0957-4484/25/39/395301
- [17] R. A. Griffiths, A. Williams, C. Oakland, J. Roberts, A. Vijayaraghavan & T. Thomson. (2013). Directed self-assembly of block copolymers for use in bit patterned media fabrication. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 46(50), 503001.
DOI: 10.1088/0022-3727/46/50/503001

이 명 복(Lee, Myung Bok)

[정회원]



- 1983년 2월 : 서울대학교 금속공학과 (공학사)
- 1985년 2월 : 한국과학기술원 재료공학과 (공학석사)
- 1996년 3월 : 동경공업대학 재료과학 전공 (공학박사)
- 2016년 2월 ~ 현재 : 광주대학교 기계·금형공학부 교수
- 관심분야 : 전자재료, 반도체재료, 기술경영
- E-Mail : mblee3@gwangju.ac.kr