



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

석사학위논문

Bi-YIG 버퍼 층을 이용한 Bi-YIG 박막
성장과 MOIM을 통한 자기장 및
마이크로파 근접장 분포 동시 영상화

양지혜

제주대학교 대학원

물리학과

2024년 2월



Bi-YIG 버퍼 층을 이용한 Bi-YIG 박막
성장과 MOIM을 통한 자기장 및
마이크로파 근접장 분포 동시 영상화

이 논문을 물리학 석사 학위 논문으로 제출함

양지혜

제주대학교 대학원

물리학과

지도교수 이한주

양지혜의 물리학 석사 학위 논문을 인준함

2024년 2월

| | | |
|-------|-----|---|
| 심사위원장 | 서혜원 | 인 |
| 위 원 | 이한주 | 인 |
| 위 원 | 유영훈 | 인 |

목차

| | |
|--|-----|
| List of Figures | iii |
| List of Tables | iv |
| 요약 | v |
| | |
| I. 서론 | 1 |
| | |
| II. 이론 | 3 |
| | |
| 1. 이트륨 철 가넷 (Yttrium iron garnet; YIG) | 3 |
| 2. 자기 광학 패러데이 회전 효과 (Magneto Optical Faraday Effect) | 4 |
| 3. 열 변색 효과 (Thermochromism) | 7 |
| 4. Metal Organic Decomposition 방법을 통한 박막의 성장 | 11 |
| 5. X-선 회절 분석법 (X-ray Diffraction; XRD) | 15 |
| | |
| III. 실험 방법 | 16 |
| | |
| 1. MOD 방법에 의한 Bi-YIG 박막 제작 및 측정 | 16 |
| 2. MOIM의 실험 장치 및 측정 원리 | 18 |
| | |
| IV. 결과 및 고찰 | 21 |
| | |
| 1. Bi-YIG의 성장 조건에 따른 XRD 결과 | 21 |
| 2. MOIM을 통한 자기장 분포와 마이크로파 근접장 분포 영상화 결과 | 25 |
| 2-1. 자기장에 대한 MOIM의 감도 | 25 |
| 2-2. 광 흡수에 대한 MOIM의 감도 | 27 |
| 2-3. 직류 전류의 세기에 따른 FR과 광 흡수 분포 | 29 |
| 2-4. 마이크로파의 주파수와 전력 세기에 따른 FR과 광 흡수 분포 | 32 |

| | |
|--|----|
| 2-5. 외부 자기장 내에서 마이크로파 근접장에 대한 FR과 광 흡수 분포 .. | 35 |
| 2-6. 동시에 흐르는 직류 전류와 마이크로파 근접장에 대한 FR과 광 흡수 분포 .. | 37 |
| V. 결론 .. | 40 |
| 참고 문헌 .. | 42 |
| Abstract .. | 44 |

List of Figures

| | |
|---|----|
| Figure 1. YIG의 결정 구조 | 8 |
| Figure 2. 자기 광학 패러데이 회전 효과 | 9 |
| Figure 3. 리간드-전이 금속 | 10 |
| Figure 4. 원자 배열에 따른 원자 사이의 에너지 | 14 |
| Figure 5. Bi-YIG 박막 제작 방법 | 17 |
| Figure 6. MOIM 실험 장치 | 20 |
| Figure 7. Bi-YIG 박막의 XRD 결과 | 23 |
| Figure 8. 자기장에 대한 MOIM의 감도 | 26 |
| Figure 9. 광 흡수에 대한 MOIM의 감도 | 28 |
| Figure 10. 직류 전류의 세기에 따른 FR과 광 흡수 동시 측정 결과 | 30 |
| Figure 11. 마이크로파의 주파수에 따른 FR과 광 흡수 동시 측정 결과와 마이크로파의 전력에 따른 광 흡수 측정 결과 | 33 |
| Figure 12. 외부 자기장과 마이크로파를 동시에 인가하였을 때 외부 자기장의 세기에 따른 FR과 마이크로파 전력의 세기에 따른 광 흡수 동시 측정 결과 | 36 |
| Figure 13. 직류 전류와 마이크로파를 동시에 인가하였을 때 FR과 광 흡수 동시 측정 결과 | 39 |

List of Tables

| | |
|--|----|
| Table 1. Garnet phase의 결정 크기 계산을 위한 Parameter | 24 |
| Table 2. Secondary phase의 결정 크기 계산을 위한 parameter | 24 |
| Table 3. 자기장 감도 계산을 위한 parameter | 26 |
| Table 4. 광 흡수 감도 계산을 위한 parameter | 28 |

Bi-YIG 버퍼 층을 이용한 Bi-YIG 박막 성장과 MOIM을 통한 자기장 및 마이크로파 근접장 분포 동시 영상화

양지혜

제주대학교 대학원 물리학과

요약

Magneto-optical indicator microscopy (MOIM)는 자기 광학 인디케이터(Magneto-optical indicator; MOI)의 자기 광학 페러데이(Magneto Optical Faraday; MOF) 효과를 활용하여 자기장의 분포를 광학적으로 영상화하는 기술로, CCD 카메라를 측정 센서로 사용하므로 주사 탐침(scanning probe) 방식을 기반으로 한 자기장 측정 장치와 달리 짧은 시간 동안 많은 신호를 얻을 수 있다. 특히 비스무스(Bi)를 첨가한 이트륨 철 가넷($\text{Bi}_x\text{Y}_{3-x}\text{Fe}_5\text{O}_{12}$; Bi-YIG) 박막에 기반한 MOI를 적용할 경우, Bi-YIG 박막의 자기 광학 특성과 온도에 의존하는 광 흡수 변화(열 변색 효과)를 통해 전류에 의해 발생하는 자기장-열의 분포를 동시에 측정할 수 있다는 것이 보고되었고, 이러한 결과는 Bi-YIG 박막에 기반한 MOIM이 소자의 동작 상태와 결함을 비파괴적으로 검출하는 데 활용될 수 있음을 보여준다. 그러나 기존 MOIM은 CCD 카메라의 응답 속도보다 빠르게 변화하는 고주파의 교류 자기장 분포를 MOF 효과를 통해 영상화하는 데 한계가 있다. 따라서 이 한계를 극복하고자, 본 연구에서는 Bi-YIG 박막의 MOF 효과와 열 변색 효과를 활용한 MOIM을 통해 정 자기장-마이크로파 자기장 분포를 동시에 영상화하는 방법에 대한 연구를 수행하였다. 또한 본 연구를 수행하기 전, 유리 기판 위에 우수한 MOF 효과를 갖는 Bi-YIG 박막을 제작하기 위한 연구를 선행하였으며, 연구 결과를 바탕으로 Bi-YIG 박막 기반 MOI를 제작하여 MOIM에 적용한 후 본 연구를 수행하였다.

먼저, 우수한 MOF 효과를 갖는 Bi-YIG 박막을 제작하기 위해, 용액에 기반한 박막 제조 방법 중 하나인 Metal-organic decomposition(MOD) 방식으로 유리 기판 위에 0.08 μm 두께의 Bi-YIG($\text{Bi}_1\text{Y}_2\text{Fe}_5\text{O}_{12}$) 박막을 증착 및 결정화하여 버퍼 층으로 사용하였다. 그리고 버퍼 층 위에 Bi-YIG($\text{Bi}_1\text{Y}_2\text{Fe}_5\text{O}_{12}$) 박막을 성장시킨 다음, X-선 회절(X-ray Diffraction; XRD)을 사용하여 박막의 결정성을 분석하였다. XRD 분석 결과, 버퍼 층 위에 Bi-YIG 박막을 성장시켰을 때 garnet phase의 결정화가 secondary phase보다 더 우세하게 나타난 것을 확인하였다. 또한 버퍼 층 위에 성장한 Bi-YIG 박막의 두께가 증가할수록 garnet phase가 집중적으로 성장한 반면, secondary phase의 성장이 억제된 것을 확인하였다. 이러한 결과를 통해, 유리 기판 위에 결정화된 Bi-YIG 박막을 버퍼 층으로 증착함으로써 우수한 MOF 효과를 가진 Bi-YIG 박막을 제작할 수 있음을 확인하였다.

선행된 Bi-YIG 박막 제조에 관한 연구의 결과를 바탕으로 MOI를 제작한 후 MOIM에 적용하여 정 자기장과 GHz 주파수로 진동하는 교류 자기장의 분포를 영상화하는 연구를 수행하였다. 두 도선을 가진 인쇄 회로 기판(Printed circuit board; PCB)을 제작하여 각 도선에 직류 전류와 교류 전류(마이크로파)를 인가하였고, 두 도선에서 발생하는 자기장 분포와 광 흡수 변화(반사율) 분포를 영상화하였다. 측정 결과로부터 직류 전류의 경우, 전류의 세기가 증가할수록 정 자기장의 세기가 증가하였으며 MOI와 PCB 사이에 유리 슬라이드를 삽입하여 직류 전류로 인해 발생하는 열이 MOI로 전달되는 것을 차단할 수 있음을 확인하였다. 마이크로파 자기장의 경우, 전력의 세기에 따라 빛의 반사율이 감소한 것을 확인하였다. 또한 각 도선에서 직류 전류와 마이크로파를 동시에 인가한 경우, Bi-YIG 박막의 MOF 효과와 열 변색 효과를 통해 정 자기장-마이크로파 자기장 분포로 동시에 영상화할 수 있음을 확인하였으며, 마이크로파 자기장에 의해 발생한 신호 간섭 현상(Coupling) 또한 측정할 수 있음을 확인하였다. 이러한 측정 결과로부터, Bi-YIG 박막을 기반으로 한 MOIM를 통해 직류 및 고주파 교류 신호가 동시에 나타나는 전자 소자의 동작 상태를 분석할 수 있으며 소자 내부의 신호 간섭 현상을 측정하는 데 중요한 기술로 활용될 수 있음을 확인하였다.

I. 서론

Magneto-optical indicator microscopy(MOIM)는 자기 광학 인디케이터(MOI)의 자기 광학 패러데이(Magneto Optical Faraday; MOF) 효과를 활용하여 광학적 신호를 자기장의 분포로 영상화할 수 있는 기술로, CCD 카메라의 각 픽셀이 광학 신호를 동시에 감지하므로 Magnetic force microscopy(MFM), Hall-probe microscope와 같이 주사 탐침(scanning probe) 방식을 기반으로 한 자기장 측정 장치보다 짧은 시간 안에 많은 신호를 얻을 수 있다는 장점이 있다 [1, 2, 3]. 특히, 기존 연구에서 비스무스(Bi)를 첨가한 이트륨 철 가넷(BixY3-xFe5O12; Bi-YIG) 박막의 자기 광학 효과와 온도에 의존하는 광 흡수 변화(열 변색 효과)를 통해 자기장의 공간적인 분포뿐 아니라 전류에 의한 열 분포를 동시에 측정할 수 있다는 것이 보고되었다 [4, 5]. 이러한 결과들은 Bi-YIG 박막에 기반한 MOIM이 작동 중인 전자 소자의 전자기 특성과 열에 대한 특성을 고해상도로 영상화할 수 있다는 것을 보여주며, 이를 기반으로 소자의 동작 상태 및 결함 등을 비파괴적으로 확인하고 검출할 수 있는 유용한 기술임을 보여준다.

최근까지 MOIM에 의한 자기장 분포 영상화는 시간적으로 느리게 변화하거나, 혹은 변화하지 않는 자기장의 분포를 영상화하는 데 활용 되어왔다. 이것은 MOIM의 측정 원리가 자기장에 대하여 선형적으로 나타나는 MOF 효과에 기반하며, 이에 따라 일반 CCD 카메라 센서의 응답 속도보다 빠르게 변화하는 자기장의 경우는 측정이 어렵기 때문이다. 특히 고주파의 교류 자기장의 분포를 MOF 효과를 통하여 영상화하는 경우, 자기장의 방향이 양의 방향에서 음의 방향으로 빠르게 진동하기 때문에 교류 자기장에 의한 MOF 효과가 서로 상쇄되어 일반 CCD 카메라 센서로 측정하는 경우 아무런 광학적 변화도 관찰되지 않는다. 따라서 최근까지 MOIM을 통한 전자기 소자의 특성에 대한 연구는 직류 전류 혹은 느리게 변화하는 교류 전류에 대한 자기장 영상화에 적용 되어왔다.

최근 마이크로파와 같은 고주파의 교류 신호는 무선 통신부터 의료 및 군사 응용까지 다양한 Radio Frequency(RF) 분야에서 적극적으로 활용 되어왔고, 소자 제조 기술의 발달로 전자기 소자의 크기가 감소함에 따라 고주파의 교류 신호에 의한 전자기 가열 및 신호 간 간섭 현상이 증가함으로써 소자의 성능이 제

한되는 것이 중요한 문제가 되고 있다 [5, 6]. 따라서 고주파의 교류 자기장 분포를 영상화하는 기술은 현대 전자기 소자의 동작 특성 및 결함 검출뿐만 아니라 다양한 물질의 전자기 특성을 분석하는 데 있어 중요한 기술로 활용될 수 있다. 실제, 최근 전자기 가열 현상에 의해 유도된 광탄성 효과를 통하여 고주파 전기장과 자기장의 분포를 영상화하는 기술인 Thermo-elastic optical indicator microscopy(TEOIM)을 통하여 고주파 자기장의 분포를 영상화할 수 있으며, 이를 활용하여 마이크로파 소자의 동작 특성과 결함 검출뿐만 아니라 다양한 물질의 전자기 특성 및 결함을 영상화할 수 있음이 보고되었다 [6]. 따라서 MOIM을 통하여 고주파 자기장의 분포를 영상화할 수 있다면 전자 소자뿐만 아니라 다양한 물질의 전자기 특성 및 결함 검출에 활용될 수 있을 것으로 기대할 수 있다. 특히 MOIM은 TEOIM과 달리 시간적으로 변화하지 않는 자기장의 분포를 영상화할 수 있으므로 직류 및 고주파 교류 신호가 동시에 나타나는 전자 소자의 동작 특성을 분석하고 이해하는 데 있어 중요한 기술로 활용될 수 있을 것으로 기대할 수 있다.

본 연구에서는 MOIM을 통하여 GHz 주파수로 진동하는 교류 자기장의 분포를 영상화하는 방법에 관한 연구를 수행하였고, 연구 결과를 통하여 Bi-YIG의 MOF 효과와 열 변색 효과를 활용하면 소자에 나타나는 정 자기장과 마이크로파 근접장의 분포를 영상화할 수 있음을 확인하였다. 먼저 본 연구를 위하여 우수한 MOF 특성을 갖는 Bi-YIG 박막 기반의 MOI를 제작하기 위한 연구를 수행하였으며, 연구 결과를 통하여 비정질의 유리 기판 위에 Bi-YIG 박막을 성장시키기 위한 최적 조건을 제시하였다. 그리고 이 조건을 기반으로 제작된 MOI를 MOIM에 적용하여 소자에 나타나는 정 자기장과 마이크로파 자기장의 분포를 영상화하는 연구를 수행하였으며, 측정 결과를 통하여 MOIM 기반의 정 자기장-마이크로파 근접장 분포의 동시 측정이 가능함을 확인하였다. 또한 MOIM을 통하여 인접한 도선 사이에서 나타나는 고주파 신호의 신호 간섭 현상을 측정할 수 있음을 확인하였으며, 이를 통해 본 기술이 전자기 소자 내부의 신호 간섭 효과를 직접적으로 측정하는 데 활용될 수 있음을 입증하였다.

II. 이론

1. 이트륨 철 가넷(Yttrium iron garnet; YIG)

이트륨 철 가넷(Yttrium iron garnet; YIG)은 희토류 철 가넷 물질 중 대표적인 준강자성(Ferrimagnet; 페리 자성) 절연체로, Curie 온도가 높기 때문에($T_c=560\text{ K}$) 상온에서 활용할 수 있으며, 낮은 자기 감쇠 및 낮은 스핀파 감쇠(spin-wave; SW), 그리고 긴 magnon 수명으로 인해 Q-microwave oscillator, Generator, Filter 및 Power limiter와 같은 마이크로파 응용 소자에 중요한 재료 물질로 널리 사용 되어왔다 [7, 8, 9].

Figure 1(a-b)에 YIG의 cubic 구조와 YIG의 자성 원리를 나타내었다. YIG의 기본 화학식은 $Y_3Fe_5O_{12}$ 로 표현되며 unit cell에서 산소 이온이 금속 이온과 배위 결합하여 세 가지의 site를 이루면서, 이트륨 이온(Y^{3+})이 십이면체(24c), Fe^{3+} 가 팔면체(16a)와 사면체(24d) 구조의 중심 원소로 들어가게 된다. 또한 팔면체 및 사면체의 철 이온 자기 모멘트는 반강자성체와 유사하게 서로 반대 방향으로 정렬되어 있으나 site의 개수 차이로 인하여 자기 모멘트가 상쇄되지 않으므로 YIG는 순 자기 모멘트가 0이 아닌 준강자성(Ferrimagnet; 페리 자성) 특징을 갖는다 [8].

기존 연구로부터, YIG의 이트륨 이온(Y^{3+})에 또 다른 희토류 원소인 Gd, Tb, Bi 등을 치환하거나 철 이온(Fe^{3+})에 Al, Cr, La 등을 치환될 때 결정 구조, 광학 및 자기 특성이 변화한다는 것이 알려져 왔으며, 특히 Y^{3+} 이온이 Bi로 치환되는 경우 가시광 영역에서의 자기 광학 특성이 많이 증가한다는 것이 알려져 왔다. 따라서 Bi-YIG는 Magneto-optic modulator, Optical isolator와 같은 광학 소자의 재료 물질로 널리 활용 되어왔다. [8, 10-17].

2. 자기 광학 패러데이 회전 효과 (Magneto Optical Faraday Effect)

자기 광학(Magneto-optical; MO) 특성이란, 편광된 빛이 물질에 의해 반사되거나 물질을 투과할 때 외부 자기장 또는 물질의 자화로 인해 편광 상태가 변화하는 현상으로, 크게 '자기 광학 커 효과(Magneto-optical Kerr effect; MOKE)'와 '자기 광학 패러데이 효과(Magneto Optical Faraday Effect; MOF)'로 나뉜다. MOKE는 빛이 물질 표면에 반사되는 경우에서 나타나는 MO 효과이며, MOF은 빛이 물질을 투과하는 경우에서 나타나는 MO 효과이다 [18]. 본 연구에서는 MOF에 의한 패러데이 회전(Faraday Rotation; FR) 효과를 사용하므로, FR에 대한 이론만 설명하고자 한다.

Figure 2(a)에 FR에 대해 나타내었다. 선형 편광된 빛이 자성체에 인가된 자기장과 평행한 방향으로 진행할 때 물질을 투과한 빛의 편광 방향은 θ_F 만큼 회전하게 되는데 이것을 '패러데이 회전' 혹은 '패러데이 효과'라고 한다. 패러데이 회전각 θ_F 는 인가된 자기장 세기, 투과한 물질의 두께와 입사된 빛의 파장에 의존하며, θ_F 의 방향 및 크기는 자기장의 방향과 세기에 선형적으로 변화한다.

패러데이 회전 효과는 우원편광(RCP)과 좌원편광(LCP) 입사광에 대한 자성체의 굴절률 차이로 설명할 수 있다. 즉, 빛의 진행 방향과 평행한 자기장이 인가된 매질에서 RCP와 LCP 성분에 대한 굴절률 차이를 통하여 설명할 수 있다.

외부 자기장이 없거나 자화가 없는 등방성 매질의 상대 유전율은 다음과 같은 텐서 행렬로 표현된다.

$$\hat{\epsilon} = \begin{pmatrix} \epsilon_{xx} & \epsilon_{xy} & \epsilon_{xz} \\ \epsilon_{yx} & \epsilon_{yy} & \epsilon_{yz} \\ \epsilon_{zx} & \epsilon_{zy} & \epsilon_{zz} \end{pmatrix} \quad (1)$$

그러나 외부 자기장에 의해 z축에 따라 자화되었을 때, 유전율 텐서 성분들이 다음과 같이 표현된다.

$$\epsilon_{xx} = \epsilon_{yy}, \epsilon_{xy} = -\epsilon_{yx}, \epsilon_{xz} = \epsilon_{yz} = \epsilon_{zx} = \epsilon_{zy} = 0 \quad (2)$$

따라서 z축으로 자화된 매질의 유전율을 다음과 같은 텐서 행렬로 나타낼 수 있다.

$$\hat{\epsilon} = \begin{pmatrix} \epsilon_{xx} + \epsilon_{xy} & 0 \\ -\epsilon_{xy} & \epsilon_{xx} & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_{zz} \end{pmatrix} \quad (3)$$

그리고 이때 RCP 및 LCP로 편광된 빛의 복소 굴절률은 다음과 같다.

$$n_{\pm} = \epsilon_{xx} \pm i\epsilon_{xy} \quad (4)$$

또한 선형 편광된 빛이 물질을 투과할 때, 빛의 RCP와 LCP 성분에 대한 전과 위상 속도(각각 V_+ 와 V_-)는 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$V_+ = \frac{c}{n_+} \quad (5)$$

$$V_- = \frac{c}{n_-} \quad (6)$$

여기서 n_+ 와 n_- 는 각각 RCP와 LCP 성분에 대한 굴절률, c 는 빛의 속도이다. (5) 식과 (6) 식에서 두 성분의 위상 속도가 다른 것을 확인할 수 있다.

굴절률 차이로 인해 RCP와 LCP 성분의 전과 위상 속도가 달라질 경우 매질을 투과한 두 성분 사이에 위상차가 발생한다. Figure 2(b)에 RCP와 LCP 성분에 대한 패러데이 회전 효과를 나타내었다. 두 성분의 위상차를 통해 패러데이 회전 각도를 구하면 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$\theta_F = -\frac{(\theta_R - \theta_L)}{2} = -\frac{\Delta\theta}{2} \quad (7)$$

여기서 θ_R 와 θ_L 은 RCP와 LCP 성분의 위상이다. (6) 식과 Figure 2(b)를 통해, 두 성분에 대한 위상이 동일할 경우 선형 편광 방향이 변화하지 않는 것을 확인할 수 있는 반면, 두 성분에 대한 위상이 다를 경우 선형 편광 방향이 θ_F 만큼 회전하는 것을 확인할 수 있다

(7) 식과 RCP와 LCP 성분의 굴절률을 고려하여 패러데이 회전 각도를 구하면 다음과 같은 식으로 표현할 수 있다.

$$\theta_F = -\frac{\Delta\theta}{2} = -\frac{\omega l(n_+ - n_-)}{c} \quad (8)$$

여기서 ω 는 각 진동수이며, l 은 투과된 물질의 두께이다. 위 식들을 통해,

외부 자기장에 의해 자화된 자성체에 선형 편광된 빛이 투과할 경우 굴절률 차이로 인해 두 원편광 간에 위상차가 발생하며, 결과적으로 선형 편광이 회전한다는 것을 확인할 수 있다 [18].

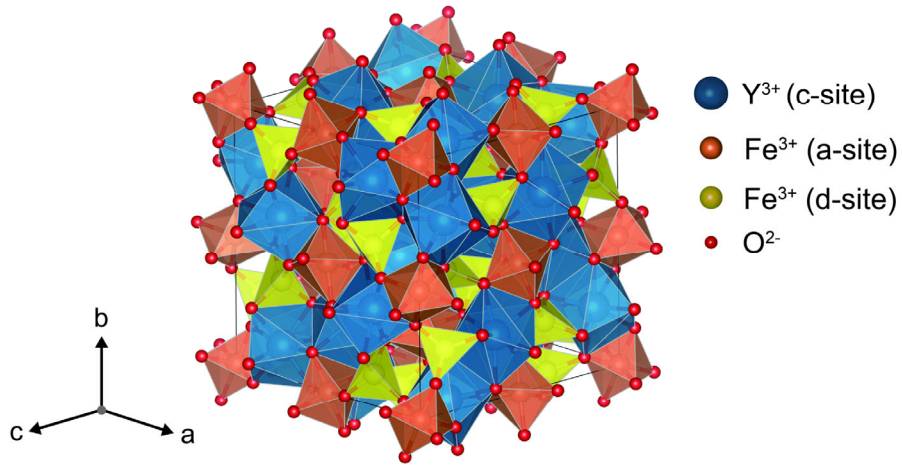
3. 열 변색 효과 (Thermochromism)

열 변색 효과(Thermochromism)란, 온도에 따라 물질의 색이 변화하는 현상으로, fever indicator, gadgets, design application 등의 온도계, 온도 센서, 레이저 마킹 등의 기술 응용 분야에서 활용될 수 있다. 산화물 및 반도체인 경우, 열 변색 효과는 온도 증가에 따른 밴드 갭 감소, 격자 왜곡으로 인한 구조 변화, 또는 배위 결합한 리간드-전이 금속 간의 상호 작용으로 인해 발생할 수 있다 [19, 20].

Figure 3에 리간드-전이 금속 배위화합물을 나타내었다. 리간드는 전이 금속과 배위 결합하는 중성분자 혹은 음이온으로 사면체 혹은 팔면체 등의 구조를 형성하며, 전이 금속은 d 궤도에 전자가 부분적으로 채워진 원소로 물질의 색에 영향을 준다. 리간드-전이 금속의 상호 작용은 두 원소의 종류, 배위 구조, 원자 궤도에 따라 발생한다. 대표적으로 d-d 전이와 Charge transfer(CT) 전이가 나타나며, 이 두 현상이 물질의 색을 결정한다. Figure 3(b)에 d-d 전이와 CT 전이를 나타내었다. 리간드와 전이 금속 간 거리가 가까워지면 전이 금속의 d 궤도가 리간드의 전자 궤도와 상호작용하면서 d 궤도의 에너지 준위가 갈라진다. 이때 d 궤도의 전자가 특정 파장의 빛을 흡수하면 갈라진 d 궤도 사이에서 전이할 수 있다. 이것을 ‘d-d 전이’ 라고 한다. 또한, 전이금속과 리간드 간의 전자가 외부 에너지를 흡수하여 두 원자 사이를 이동하는 경우, 이를 ‘CT 전이’ 라고 한다. 이 두 전이 현상이 발생할 때 전자가 빛을 흡수하며, 결과적으로 흡수되지 않은 빛의 파장이 물질의 색으로 관측된다.

기존 연구로부터, YIG가 가시광 영역에서 발생하는 철 이온(Fe^{3+})의 d-d 전이와 리간드-전이 금속 간 CT 전이($O^{2-} + Fe^{3+} \rightarrow O^- + Fe^{2+}$)에 의해 상온에서 초록색을 띠는 것이 알려져 있다. 또한 온도가 증가할수록 YIG의 격자 상수가 증가함으로써 리간드-전이 금속 간 전자 이동이 더 낮은 에너지에서 발생하며, 이 현상으로 인해 YIG의 색이 온도에 따라 초록색에서 갈색으로 지속적인 변화가 나타나는 것이 보고되었다 [5].

(a)



(b)

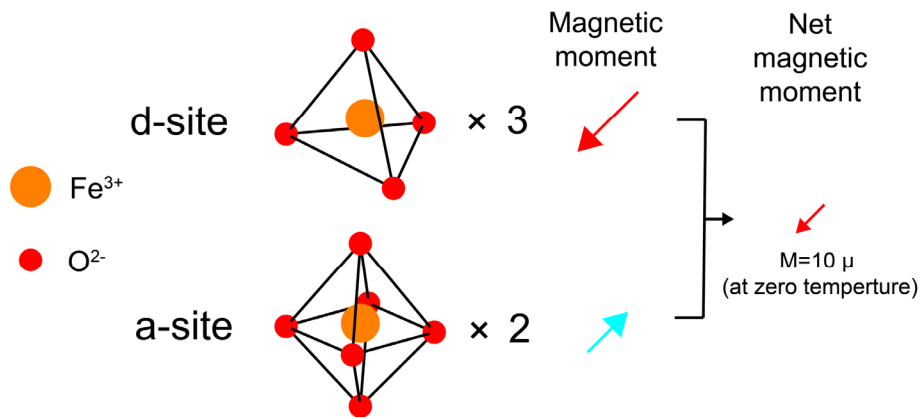


Figure 1. YIG의 결정 구조와 자성 원리 (a) YIG의 Cubic 구조를 나타낸 그림이다. 파란색 구는 이트륨 이온(Y^{3+})으로, 산소 이온(O^{2-} , 빨간색 구)으로 형성된 십이면체(c-site)의 중심에 들어간다. 주황색 구는 철 이온(Fe^{3+})으로, 산소 이온으로 형성된 팔면체(a-site)의 중심에 들어간다. 노란색 구는 철 이온(Fe^{3+})으로, 산소 이온으로 형성된 사면체(d-site)의 중심에 들어간다. (b) YIG의 자성 원리를 나타낸 그림이다. 주황색 원은 산소 이온(빨간색 원)과 팔면체(a-site) 혹은 사면체(d-site)를 이루는 철 이온이다. 빨간색 화살표와 파란색 화살표는 두 구조가 갖는 자기 모멘트 방향과 크기이며, 주황색 화살표는 두 구조의 자기 모멘트를 합한 순 자기 모멘트이다.

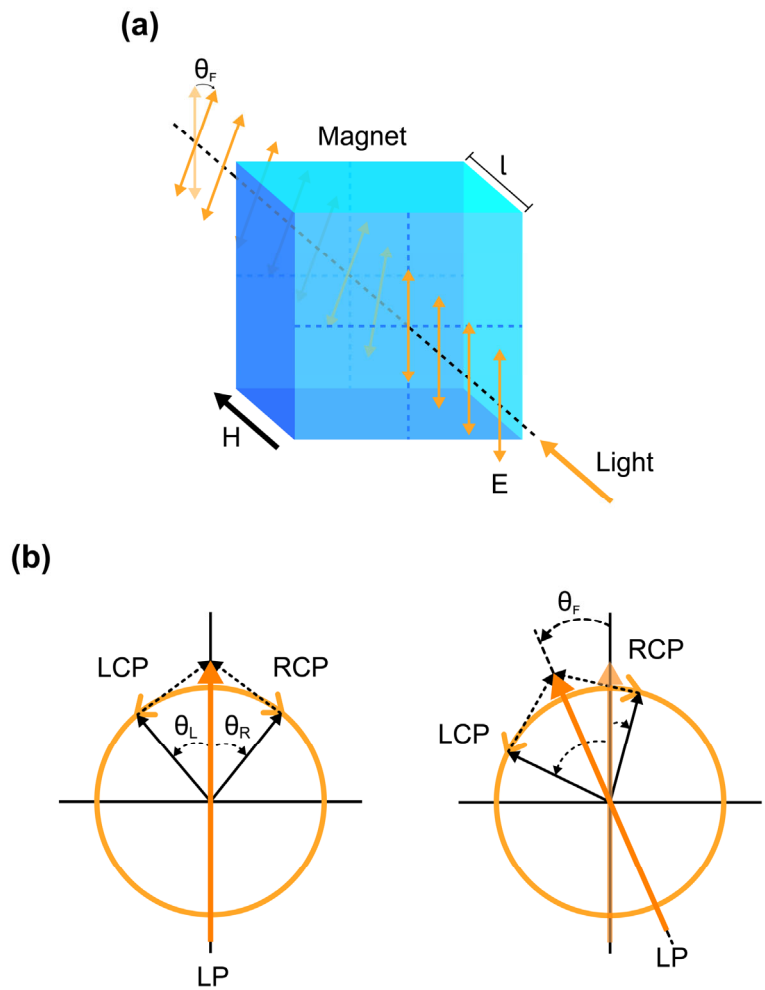
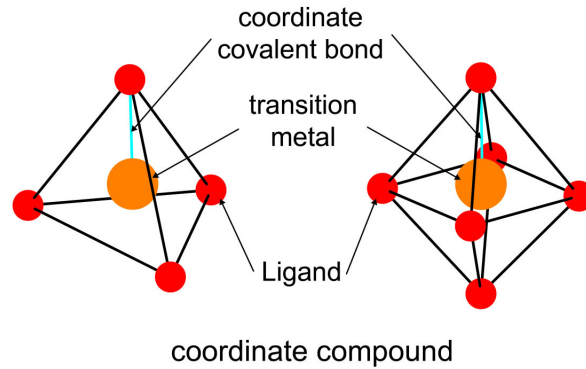
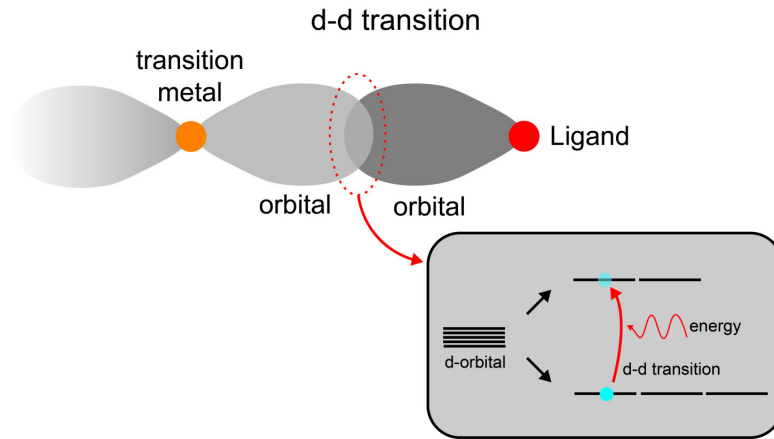


Figure 2. 자기 광학 패러데이 회전 효과 (a) 패러데이 회전(Faraday Rotation)을 나타낸 그림이다. 두께가 1인 자성체에 외부 자기장 H를 인가하고, 자기장 방향과 평행한 방향으로 빛을 조사하였다. E는 조사한 빛의 전기장 방향이며, θ_F 는 패러데이 회전 각도이다. (b) 우원편광(RCP) 성분과 좌원편광(LCP) 성분의 위상차로 인해 발생하는 패러데이 회전 효과를 나타낸 그림이다. 좌측은 RCP와 LCP 성분의 위상이 동일한 경우에서 선형 편광(LP)을 의미하며, 우측은 RCP와 LCP 성분의 위상이 다른 경우 선형 편광(LP)의 변화를 의미한다. 또한 θ_R 은 RCP 성분의 위상, θ_L 은 LCP 성분의 위상이며, θ_F 는 선형 편광(LP)의 회전 각도(즉, 패러데이 회전 각도)이다.

(a)



(b)



CT transition

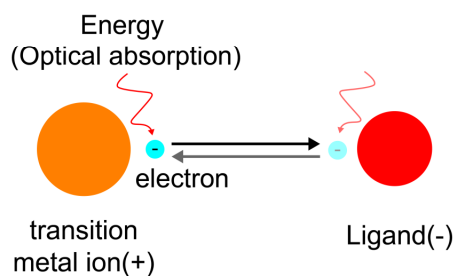


Figure 3. 리간드-전이 금속 (a) 리간드-전이 금속 배위화합물을 나타낸 그림으로, 좌측은 사면체 구조, 우측은 팔면체 구조이다. 주황색 원은 전이 금속이며 빨간색 원은 리간드이다. 그리고 파란색 선은 리간드와 전이 금속의 배위 결합이다. (b) 리간드-전이 금속 상호작용을 나타낸 그림이다. 위측은 d-d 전이가 일어나는 원리이며, 아래측은 CT 전이가 일어나는 원리이다.

4. Metal Organic Decomposition (MOD) 방법을 통한 박막의 성장

박막이란 나노미터에서 수 마이크로미터의 두께를 갖는 얇은 막을 의미하며, 물질의 마모 및 부식을 방지할 뿐 아니라 물질 표면에 전기적, 광학적, 기계적, 화학적 특성과 같은 특수한 특성을 부여할 수 있기 때문에 보호 필름 코팅 기술부터 마이크로 소자 및 반도체 소자 등의 산업 분야까지 널리 응용되고 있다 [21]. 특히 반도체 분야에서 소자의 미세화가 진행되면서 얇고 균일한 박막을 제조하기 위한 다양한 방법이 연구 되어왔다. 박막을 제조하는 대표적인 방법으로 진공 기술을 활용한 물리 증착(Physical Vapor Deposition; PVD)과 화학 증착(Chemical Vapor Deposition; CVD), 그리고 용액에 기반한 Liquid phase epitaxy (LPE), sol-gel method, Metal-organic decomposition(MOD) 등이 있다 [22-25].

박막을 제작하는 과정에서 기판의 종류, 열처리 온도, 증착 속도 등의 조건에 따라 특정한 물리적 및 화학적 특성을 갖는 다양한 미세 구조가 형성되며, 그중 열처리 온도가 박막의 결정화에 큰 영향을 주는 것이 알려져 있으므로 원하는 특성을 얻기 위해서는 적절한 조건을 설정하는 것이 필수적이다. 박막 제조는 일반적으로 고온에서 진행되기 때문에, 기판과 박막 사이의 열팽창 계수 차이가 큰 경우, 그리고 기판과 박막 사이의 격자 상수 차이가 큰 경우에서 응력이 발생하게 되며, 이로 인해 박막에 균열 및 변형이 일어나 박막의 결정성을 저하시키거나 박막 간의 부착력이 감소 되는 등의 다양한 문제가 나타난다 [22]. 따라서 이러한 문제를 해결하기 위해 박막의 격자 상수 및 열팽창 계수와 일치하는 기판을 선택하거나, 기판 위에 버퍼 층(buffer layer)를 형성하여 응력을 완화시키는 방법이 사용 되어왔으며, 적절한 열처리 온도를 설정하여 박막의 결함을 감소시키는 방법 또한 사용 되어왔다.

본 연구에서 연구된 가넷 박막의 화학 조성은 $\text{Bi}_1\text{Y}_2\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ 으로, 일반적으로 가넷 박막의 격자 상수와 거의 일치하는 Gadolinium gallium garnet(GGG) 단결정 기판 위에 제작된다. 그러나 최근 가넷 박막이 스핀트로닉스 및 마이크로파 응용 소자, 자기 광학 장치 등 다양한 분야의 재료 물질로 활용되면서 경제적으로 이점이 있는 비정질 기판 위에 가넷 박막을 제조하기 위한 다양한 방법이 연구 되어왔고, 그중 진공 기술을 활용한 공정 방법보다 열처리 온도가 상대적으로

낮고 대량 생산에 유리한 용액 기반 공정 방법을 통해 비정질 기판 위에 우수한 결정성을 갖는 가넷 박막을 제조하는 연구가 활발히 이루어지고 있다.

용액 기반 공정 방법 중, MOD 방식은 금속 원소들이 용해 되어 있는 유기금속 화합물 용액을 기판 위에 도포한 후 고온에서 열처리(Annealing) 과정을 통해 결정화시키는 방식으로, sol-gel 방식에 비하여 화학적으로 안정한 물질을 사용하기 때문에 조성비가 균일한 박막을 제작할 수 있다는 장점이 있다 [25]. 기존 연구에서, MOD 방식을 활용하여 Bi-YIG 박막을 비정질의 유리 기판 위에 성장시킬 수 있으며, MOD 방법에 기반한 Bi-YIG 박막의 MO 특성이 열처리 과정에 따라 변화하는 박막의 결정성에 따라 달라진다는 것이 보고된 바 있다. 다결정 Bi-YIG 박막의 어닐링 과정에서 garnet phase 외에 $YFeO_3$, $BiFeO_3$, Fe_2O_3 등의 이차 상 (secondary phase) 등이 같이 성장하게 되는데, 이차 상으로의 결정화가 억제될수록 Bi-YIG 박막의 MO 특성과 자기 특성이 향상된다 [26]. 따라서 Bi-YIG 박막의 MO 특성을 높이기 위해서는 garnet phase 형성을 집중적으로 높이고 secondary phase 형성을 최대한 억제하는 것이 중요하다.

어닐링(annealing)은 물질을 적절한 온도에서 가열하여 일정 시간 동안 온도를 유지하고, 이후 천천히 냉각하는 과정을 반복하여 물질의 내부 응력을 줄이고 결정을 성장시키는 공정 방법이다. 어닐링의 목적은 물질의 미세한 입자를 생성하고, 물질의 전기 및 자기 특성, 또는 물질의 결정성을 높이는 것이다 [27]. MOD 방식에서 어닐링은 사전 어닐링(Pre-annealing)과 최종 어닐링(Final-annealing) 단계를 거치며, 두 과정에서 설정한 온도와 시간에 따라 결정의 조성 과 구조가 달라진다. Figure 4에 원자 배열에 따른 에너지 준위를 나타내었다. 사전 어닐링은 저온에서 열처리하는 단계로, 내부 응력에 의한 물질의 균열과 변형을 방지하고 기판 표면에 작은 결정을 형성한다. 그러나 이 단계에서 형성된 결정은 높은 에너지 준위를 갖기 때문에 원자 배열이 불안정한 상태를 유지하므로 비정질(Amorphous) 구조를 이룬다. 최종 어닐링(Final-annealing)은 사전 어닐링보다 높은 온도에서 열처리하는 단계로, 에너지 준위가 가장 낮은 상태로 안정되면서 비정질 구조를 유지하던 원자의 배열이 특정한 패턴으로 재배열되어 결정질(Crystalline) 구조를 이룬다 [28]. 이전 연구에서 Bi-YIG 박막을 제작할 때, 사전 어닐링의 온도와 최종 어닐링의 온도에 따라 박막의 결정상이

크게 변화하는 것이 보고된 바 있다 [3]. 이것은 박막의 결정성에 대한 에너지 구조가 다양한 준 안정점을 갖는 복잡한 형태로 되어 있으며, 우수한 결정성을 갖는 Bi-YIG 박막 제작을 위해서는 어닐링 온도 및 시간을 적절하게 조절하는 것이 중요하다는 것을 의미한다.

박막의 경우 결정성에 대한 에너지 구조는 온도뿐만 아니라 기판의 상태에도 크게 의존하게 된다. 특히, 박막 결정은 성장 과정에서 결정면의 성장 속도에 따라 우선 성장 방향이 결정되며, 그 방향을 갖는 결정면을 따라 우선적으로 성장한다[29]. 따라서 우수한 결정성을 가진 박막을 얻기 위해서는 기판과 박막의 격자 상수가 거의 일치할 뿐만 아니라 원하는 화학 조성을 갖는 결정면이 우선 성장할 수 있도록 기판에 적절한 표면 처리를 해야 한다. 기판과 물질의 격자 상수가 크게 다른 경우, 격자 상수 차이를 줄이기 위해 기판과 박막 사이에 격자 상수 차이를 줄일 수 있는 버퍼 층(Buffer layer)을 증착하는 방법을 많이 사용한다. 따라서 Bi-YIG 박막을 유리 기판 위에 성장시킬 때, 유리 기판 위에 이미 결정화된 Bi-YIG 박막을 증착하여 버퍼 층으로 사용한다면 기판과 박막 사이의 격자 상수를 줄이는 동시에 우선 성장 방향을 결정하여 비정질의 유리 기판 위에서도 우수한 결정성을 갖는 Bi-YIG 박막을 제작할 수 있을 것으로 기대할 수 있다.

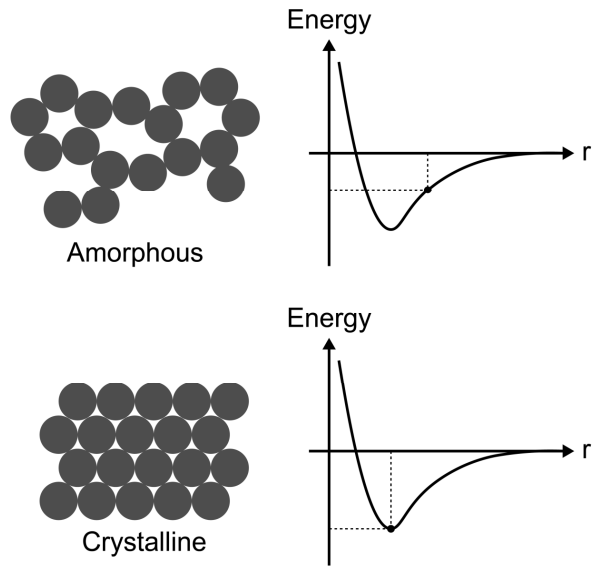


Figure 4. 원자 배열에 따른 원자 사이의 에너지 (a) 원자 배열에 따른 에너지 준위를 나타낸 그림이다. 우측의 회색 원은 임의의 원자이며, 위측은 Amorphous이고 아래측은 Crystalline 배열이다. 좌측은 원자 배열에 대한 원자 간 거리에 따른 에너지 변화를 나타낸 그래프이다,

5. X-선 회절 분석법 (X-ray Diffraction; XRD)

X-선 회절 분석은 물질의 상 조성, 결정 구조 및 방향 등의 물리적 특성을 분석하기 위한 비파괴 분석 기법으로, X-선이 물질로 입사할 때 주기적으로 배치된 결정 구조에 의해 X-선이 회절하는 패턴을 분석하여 시료의 결정 구조를 분석한다. X-선 회절에서 회절 패턴, 회절 강도, 그리고 최대 회절 강도의 위치 (브래그 각도 등)가 물질과 물질의 결정 구조에 따라 의존하기 때문에, X-선 회절 무늬를 이용하여 물질의 종류에 대한 정보를 얻을 수 있다. XRD에 대한 기하학적 해석은 W.L. Bragg(Bragg, 1913)에 의해 제안된 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$n\lambda = 2d_{hkl}\sin\theta \quad (9)$$

여기서, n 은 회절 순서($n=1, 2, 3, \dots$), λ 는 입사한 X-선의 파장, d_{hkl} 은 물질 내에서 주기적으로 배열된 원자와 원자 사이의 간격, 그리고 θ 는 회절된 X-선의 각도이다. 단결정 물질에서는 점 패턴을 형성하며 하나의 회절 Peak만 나타나는 반면, 다결정 물질에서는 링 패턴을 형성하며 XRD 측정 결과에서 여러 개의 회절 Peak가 나타난다 [30]. 따라서 물질의 패턴 차이를 분석함으로써 물질의 종류와 결정 방향을 파악할 수 있다.

III. 실험 방법

1. MOD 방법에 의한 Bi-YIG 박막 제작 및 측정

Figure 5(a)에 Sping coating 방법을 나타내었다. Spin coating 방법은 스핀 코터(Spin-coater)를 이용하여 진공이 아닌 상태에서 박막을 성장시킬 수 있는 유용한 방법으로, 넓은 면적을 가진 기판에 박막을 형성시킬 수 있고 스핀 코팅 횟수와 스핀 코터의 회전 속도에 따라 박막 두께를 조절할 수 있다는 장점이 있다 [31].

Figure 5(b)에 Bi-YIG 박막 제작 과정을 도식적으로 나타내었다. 본 연구에서는 MOD 방법과 Spin coating 방법을 사용하여 유리 기판 위에 Bi-YIG 박막을 제작하였다. 모든 시료의 박막은 화학 조성이 $\text{Bi}_1\text{Y}_2\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ 인 MOD 용액으로 제작하였으며, 유리 기판 위에 3,000 rpm의 속도로 30초간 스핀 코팅하여 제작하였다. 여기서 일부 기판 위에 버퍼 층을 제작하기 위해, 유리 기판 위에 약 $0.08 \mu\text{m}$ 두께의 Bi-YIG 층을 100°C 에서 1시간 건조하였으며, 400°C 에서 사전 열처리(pre-annealing) 작업을 10분 진행하였고, 750°C 에서 최종 열처리(Final-annealing) 작업을 1시간 진행하여 버퍼 층으로 결정화하였다. 그리고 버퍼 층과 동일한 조성을 가진 Bi-YIG 용액($\text{Bi}_1\text{Y}_2\text{Fe}_5\text{O}_{12}$)으로 버퍼 층 위에 도포 하여 1회마다 건조 작업을 100°C 에서 30분, 사전 열처리 작업을 400°C 에서 10분 진행하였다. 마지막으로 각 시료의 박막 성장 작업을 5회, 10회 반복하였고, 750°C 에서 1시간 동안 최종 열처리 과정을 진행하여 박막을 결정화하였다. 본 연구에서는 버퍼 층을 제작하지 않은 상태에서 박막을 성장시킨 횟수가 5회인 시료(A1; thickness $\approx 0.42 \mu\text{m}$)와, 버퍼 층 위에 박막을 성장시킨 횟수가 각 5회(B1; thickness $\approx 0.5 \mu\text{m}$), 10회 (B2; thickness $\approx 0.92 \mu\text{m}$)인 시료를 제작하였다.

제작된 시료 내에서 결정상(garnet phase와 secondary phase)의 결정 크기를 구하기 위해 XRD 측정을 하였다. $\text{CuK}\alpha$ ($\lambda \approx 1.54 \text{ nm}$)인 X-선을 시료 표면에 입사하였으며, $25^\circ \sim 40^\circ$ 범위의 입사각에 대한 회절 peak을 측정하였다.

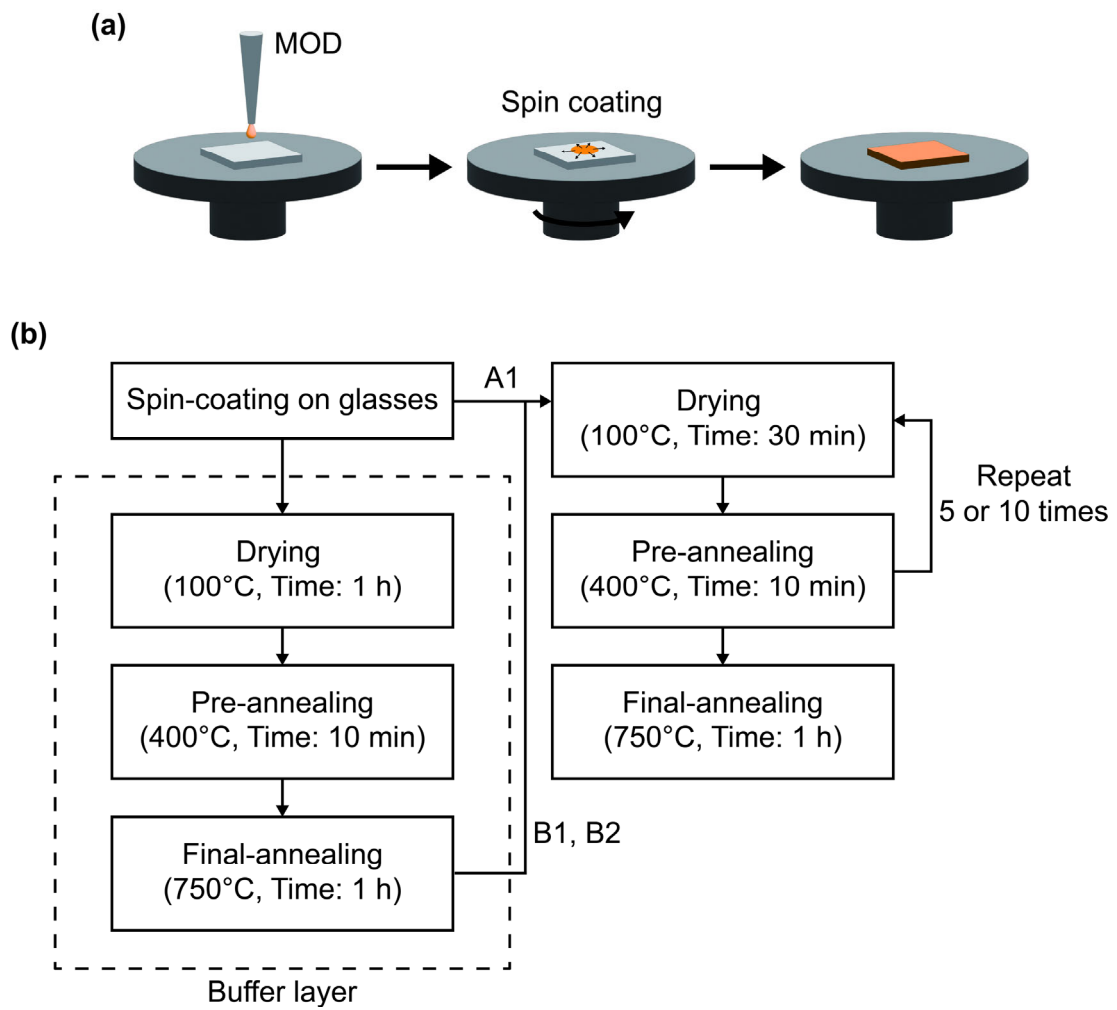


Figure 5. Bi-YIG 박막 제작 방법 (a) spin coating 방법의 순서를 나타낸 그림이다. (b) Bi-YIG 박막 형성을 위한 열처리 과정을 도식적으로 나타낸 그림이다.

2. MOIM 실험 장치 및 측정 원리

Figure 6에 MOIM의 실험 장치를 나타내었다. 유리 기판에 Bi-YIG 박막을 증착한 후 알루미늄 박막을 증착하는 방식으로 MOI를 제작하였고, 제작된 MOI를 인쇄 회로 장치 위에 올린 후 CCD 센서를 기반으로 한 편광 현미경 시스템으로 측정하였다.

2-1. MOIM을 통한 정 자기장 영상화

편광자에 의해 선형 편광된 입사광은 전압에 따라 편광이 바뀌는 액정 변조기(Liquid crystal Modulator)에 의해 수평 편광과 수직 편광 상태로 변조되어 MOI로 전달된다. 시료로 사용된 인쇄 회로 장치(PCB)의 도선에 직류 전류가 흐르고 있는 경우, 도선 주변에 발생한 자기장으로 인해 Bi-YIG의 자화 방향이 변화하며, 이에 따라 입사광의 편광이 Bi-YIG의 자화 방향에 따라 회전하는 FR 효과가 나타난다. Bi-YIG 박막을 통과한 입사광은 알루미늄 막에 의해 반사되고, 다시 Bi-YIG 박막을 통과하게 되는데, 이에 따라 MOI에서 반사된 입사광의 편광 방향은 결과적으로 2배 회전한 상태가 된다. 마지막으로, MOI로부터 반사된 입사광은 편광 각도가 45° 고정된 편광자를 통과하고, 이때 FR에 의해 변화한 입사광의 편광 각도에 따라 투과광의 세기가 변화한다. 여기서 투과광의 밝기 변화는 다음과 같은 식으로 표현될 수 있다.

$$I_H = (1 + \sin 2\theta_F) \frac{|E_x|^2}{2} \quad (10)$$

$$I_V = (1 - \sin 2\theta_F) \frac{|E_y|^2}{2} \quad (11)$$

여기서 I_H 와 I_V 는 각각 편광이 수평 상태일 때와 수직 상태일 때 측정되는 투과광의 세기, θ_F 는 FR angle이다. 그리고 E_x 와 E_y 는 조사된 빛의 전기장 크기이다.

여기서 편광된 빛이 LCM을 통과하였을 때, 편광 방향만 변화하고 전기장 세기가 변하지 않으므로 (10), (11) 식의 전기장 크기 E_x 와 E_y 는 서로 동일하다. 이

를 고려하여 투과광의 편광이 수평 상태일 때 세기와 수직 상태일 때의 세기의 차이를 구하면, FR angle을 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$I_H - I_V = \frac{|E_x|^2}{2} [(1 + \sin 2\theta_F) - (1 - \sin 2\theta_F)] \quad (12)$$

$$\theta_F = \frac{1}{2} \arcsin \left[\frac{I_H - I_V}{I_H + I_V} \right] \quad (13)$$

여기서 만약 θ_F 가 매우 작다면 다음과 같이 근사적으로 밝기 차이를 통하여 θ_F 를 나타낼 수 있다.

$$\theta_F = \frac{1}{2} \left[\frac{I_H - I_V}{I_H + I_V} \right] \quad (14)$$

PCB 시료에 마이크로파가 흐르는 경우, 마이크로파 자기장에 의한 θ_F 는 GHz의 주파수로 진동하게 되며, 결과적으로 일반적인 CCD 카메라로 측정하는 경우 θ_F 의 변화가 나타나지 않는다. 반면 MOI의 Al 박막에 마이크로파 근접장이 인가되는 경우 마이크로파 자기 근접장에 의한 Joule Heating에 의해 Al 박막이 가열되게 되며, 이 가열 분포는 시간에 따라 변화하지 않는다. 가열된 Al 박막은 Bi-YIG로 열에너지를 전달하게 되는데, 이때 전달된 열 분포는 MOI에 작용하는 마이크로파 자기 근접장의 분포와 일치하게 된다. 그리고 Al로부터 열에너지를 받은 Bi-YIG 박막에는 온도 증가로 자기 근접장의 분포와 일치하는 열 변색 효과의 공간적 분포가 나타나게 되며, 이 분포는 입사광에 대한 광 반사도 변화를 통하여 영상화할 수 있다. 온도 변화에 따른 MOI의 반사율 변화는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta Reflectance = \left[\frac{(I_H + I_V)_{T+\Delta T} - (I_H + I_V)_T}{(I_H + I_V)_T} \right] \quad (15)$$

여기서 T는 온도, ΔT 는 근접장 가열에 의한 MOI의 온도변화, 그리고 $\Delta Reflectance$ 은 MOI의 반사율 변화를 의미한다.

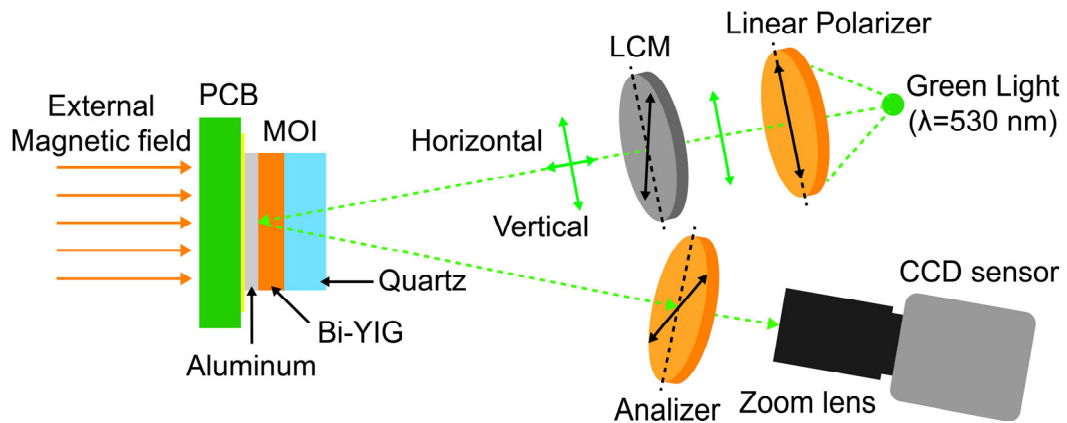


Figure 6. MOIM 실험 장치 (a) 파장이 530 nm인 광원을 사용하는 MOIM을 나타낸 그림이다. Quartz 기판(thickness: 1 mm)에 Bi-YIG 박막(thickness \approx 0.92 μ m)과 알루미늄(thickness \approx 10 nm)을 증착한 MOI를 인쇄 회로 기판(PCB; Printed Circuit Board) 위에 놓고 편광을 측정하였다. 선형 편광자에 의해 편광된 빛이 전압에 따라 편광이 변하는 액정 변조기(LCM; Liquid crystal Modulator)를 통해 수평 편광(0°) 혹은 수직 편광(90°)으로 변조되며, MOI로 전파된 빛이 알루미늄 막에서 반사되어 Analyzer와 CCD 센서로 향한다. 여기서 Analyzer의 편광 방향을 45° 로 고정하였다.

IV. 결과 및 고찰

1. Bi-YIG의 성장 조건에 따른 XRD 결과

Figure 7에 Bi-YIG 박막의 성장 조건에 따른 XRD 측정 결과를 나타내었다. 본 측정 결과로부터, 제작된 모든 Bi-YIG 박막에서 회절 각도 29° , 32° , 그리고 35° 부근에서 garnet phase에 해당하는 회절 peak가 나타나는 것을 확인할 수 있으며, 기존에 보고된 것과 동일하게 32° 부근의 회절 peak가 가장 높고 날카로운 것을 확인할 수 있다. 또한 회절 각도 33° 부근에서 secondary phase(YFeO_3)에 해당하는 회절 peak가 나타나는 것을 확인할 수 있다. 이러한 결과는 제작된 모든 Bi-YIG 박막이 서로 동일한 구조를 가졌으며 다결정 상의 물질임을 의미한다.

각 시료에 대한 XRD 결과에서 시료 A1의 경우, garnet phase와 secondary phase peak의 높이가 유사한 반면, 시료 B1의 경우 garnet phase peak의 높이가 secondary phase peak보다 큰 것을 확인할 수 있다. 이것은 시료 B1에서 garnet phase로의 결정화가 secondary phase보다 우세하게 나타난 것을 의미한다. 또한 시료 B2의 경우, garnet phase와 secondary phase의 peak 높이 차이가 더 증가한 반면, B1과 B2의 secondary phase의 peak 높이 차이는 거의 없는 것을 확인할 수 있다. 이것은 박막의 두께가 증가함에 따라 garnet phase로의 결정화가 더 강하게 진행된 반면, secondary phase로의 결정화는 약하게 나타난 것을 의미한다.

Bi-YIG의 박막 성장 조건에 따른 결정성과 두 phase의 결정 크기를 확인하기 위해 XRD 측정을 수행하였으며, 측정 데이터를 통하여 결정 크기는 Scherrer 방정식으로 계산하였다.

$$\tau = \frac{K\lambda}{\beta \cos\theta} \quad (16)$$

여기서 τ 는 결정 크기, K 는 Scherrer 상수($=0.89$), λ 는 X-ray의 파장(0.154 nm), β 는 회절 peak의 FWHM(Full Width at Half Maximum), 그리고 θ 는 회절

각도를 나타낸다.

Table 1에 garnet phase의 여러 회절 각도 중 가장 높은 peak를 갖는 회절 각도(32° 부근)의 결정면과 β (FWHM), 그리고 이로부터 계산된 결정의 크기를 나타내었다. Table 1로부터 시료 A1의 FWHM이 8.2×10^{-3} radian으로 가장 크고, 시료 B2의 FWHM이 6.7×10^{-3} radian으로 가장 작은 것을 확인할 수 있다. 그리고 계산 결과로부터 garnet phase의 결정 크기가 A1에서 17.4 nm, B1에서 18.8 nm, 그리고 B2에서 21.3 nm임을 확인할 수 있다.

Table 2에 secondary phase의 peak를 갖는 회절 각도(33°)의 β (FWHM), 그리고 결정 크기를 나타내었다. Table 2를 통해서, 시료 A1의 FWHM이 시료 B1과 B2의 FWHM보다 작은 것을 확인할 수 있으며, 시료 B2의 FWHM이 시료 B1의 FWHM보다 작은 것을 확인할 수 있다. 또한 계산 결과로부터 secondary phase의 결정 크기가 시료 A1에서 14.2 nm, 시료 B1에서 13.2 nm, 시료 B2에서 13.7 nm임을 확인할 수 있다.

본 계산 결과를 통해, 시료 B1의 garnet phase가 시료 A1의 garnet phase보다 더 강하게 형성된 반면, 시료 B1의 secondary phase가 시료 A1의 secondary phase보다 더 약하게 형성된 것을 확인할 수 있다. 이러한 결과는 garnet phase와 secondary phase의 형성이 버퍼 층으로부터 영향을 받는다는 것을 의미하며, 버퍼 층이 있을 때 garnet phase가 secondary phase보다 더 강하게 형성된 것을 의미한다. 또한 시료 B1과 B2의 결정 크기로부터, garnet phase가 18.8 nm에서 21.3 nm로 증가하고, secondary phase가 13.2 nm에서 13.7 nm로 증가함으로써, garnet phase의 결정 크기가 secondary phase의 결정 크기보다 더 크게 증가한 것을 확인할 수 있다. 이러한 결과는 버퍼 층을 제작한 상태에서 박막의 두께가 증가할 때, garnet phase가 집중적으로 강하게 형성된 것을 의미한다.

본 실험 결과로부터, 동일한 물질 조성과 어닐링 조건 내에서 박막을 제작할 때, 버퍼 층이 garnet phase와 secondary phase의 결정 형성에 영향을 주며, 버퍼 층을 제작한 상태에서 Bi-YIG 박막을 성장시키면 garnet phase를 집중적으로 형성시킬 수 있음을 확인할 수 있다. 따라서 본 실험 결과를 통해, 기판 위에 버퍼 층을 제작하고, 버퍼 층 위에 Bi-YIG 박막을 성장시키면 우수한 결정성을 가진 Bi-YIG 박막을 제조할 수 있음을 알 수 있다.

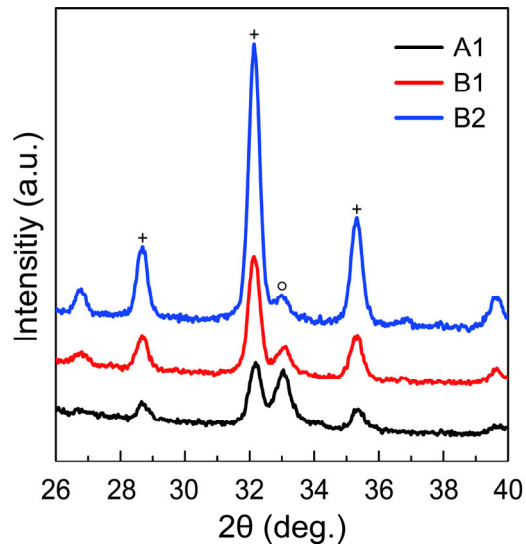


Figure 7. Bi-YIG 박막의 XRD 결과 제작된 Bi-YIG 박막의 XRD 측정 결과이다. 작은 십자는 garnet phase를 의미하며, 작은 원은 secondary phase(YFeO_3)를 의미한다. 또한 검은색 선은 버퍼 층을 제작하지 않은 상태에서 박막 성장을 5회 반복한 시료(A1)이며, 빨간색 선은 제작된 버퍼 층 위에서 박막 성장을 5회 반복한 시료(B1)이다. 그리고 파란색 선은 제작된 버퍼 층 위에서 박막 성장을 10회 반복한 시료(B2)이다.

| | Peak position (2θ) | Plane (hkl) | β (radian) | Crystallite Size (nm) |
|----|--------------------------------|----------------|----------------------|-----------------------------|
| A1 | 32.18 | (420) | 8.2×10^{-3} | 17.4 |
| B1 | 32.15 | (420) | 7.6×10^{-3} | 18.8 |
| B2 | 32.14 | (420) | 6.7×10^{-3} | 21.3 |

Table 1. Garnet phase의 결정 크기 계산을 위한 Parameter. Peak position은 가넷 상의 회절 peak 위치이며, Plane은 garnet phase의 결정 방향이다. 또한 β 는 FWHM(Full Width at Half Maximum)이다.

| | Peak position (2θ) | Plane (hkl) | β (radian) | Crystallite Size (nm) |
|----|--------------------------------|----------------|-----------------------|-----------------------------|
| A1 | 33.02 | | 10.1×10^{-3} | 14.2 |
| B1 | 33.05 | | 10.8×10^{-3} | 13.2 |
| B2 | 33 | | 10.4×10^{-3} | 13.7 |

Table 2. Secondary phase의 결정 크기 계산을 위한 parameter. Peak position은 secondary phase의 회절 peak 위치이며, β 는 FWHM(Full Width at Half Maximum)이다.

2. MOIM을 통한 자기장 분포와 마이크로파 근접장 분포 영상화 결과

2-1. 자기장에 대한 MOIM의 감도

자기장에 대한 측정 감도를 정량화하기 위해 자기장 세기에 따른 FR의 변화를 측정하였다. 본 측정에서 자기장 측정 감도는 잡음 등가 신호(NES; Noise Equivalent Signal)를 통해 계산하였다.

$$NES = \frac{N_{rms}}{SITF_{slope}} = N_{rms} \frac{\Delta P}{\Delta R} \quad (17)$$

여기서 N_{rms} 는 주어진 영역 안에서 각 픽셀의 표준 편차이며, $SITF_{slope}$ 는 외부 자기장의 변화(ΔP)에 대한 FR 변화(ΔR)의 기울기이다. 위 식에서 N_{rms} 는 누적된 이미지 수와 관련되어 있으므로 1,000장, 5,000장, 그리고 10,000장까지 누적된 이미지에 따른 FR 측정을 수행하였다.

Figure. 8에 이미지 1,000장, 5,000장, 그리고 10,000장 누적하였을 때 자기장의 세기에 따른 FR의 변화를 나타내었다. 측정 결과로부터 자기장의 세기가 증가할수록 FR이 선형적으로 증가한다는 것을 확인할 수 있으며 누적된 이미지 수가 증가하여도 기울기의 차이가 거의 없는 것을 확인할 수 있다.

Table. 3에 누적된 이미지 수에 따른 N_{rms} , $SITF_{slope}$, 그리고 Sensitivity를 나타내었다. 여기서 $SITF_{slope}$ 를 Bi-YIG 박막의 두께가 1 μm 일 때로 환산하였는데, 이것은 FR이 박막의 두께에 의존하기 때문이다. 계산 결과로부터, 누적된 이미지 수가 1,000장, 5,000장, 그리고 10,000장까지 증가하였을 때 N_{rms} 가 감소하는 것을 확인할 수 있으며, 이를 통해 Sensitivity가 누적된 이미지 수에 따라 0.043 $\text{mT} \cdot \mu\text{m}$ 부터 0.04 $\text{mT} \cdot \mu\text{m}$ 까지 감소하는 것을 확인할 수 있다. 따라서 본 실험 결과를 통해 Bi-YIG 박막의 두께 1 μm 에서 측정할 수 있는 최소 자기장의 값이 기존 연구(0.03 $\text{mT} \cdot \mu\text{m}$)와 유사한 0.04 $\text{mT} \cdot \mu\text{m}$ 임을 확인할 수 있다.

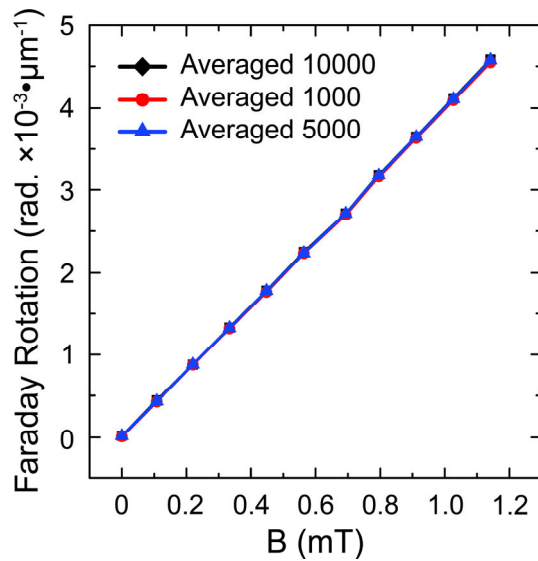


Figure 8. 자기장에 대한 MOIM의 감도 MOI(material: Bi-YIG; thickness ~1 μm) 표면에 수직으로 인가된 외부 정적 자기장에 따른 FR의 변화를 나타낸 그래프이다. 검은색 선은 누적된 이미지의 수가 10,000장인 경우이며 빨간색 선과 파란색 선은 누적된 이미지의 수가 각각 1,000장과 5,000장인 경우이다.

| Number of Images | N_{rms} | $SITF_{slope}$ ($mT^{-1} \cdot \mu m^{-1}$) | Sensitivity ($mT \cdot \mu m$) |
|------------------|-----------------------|--|-------------------------------------|
| 1000 | 1.69×10^{-4} | 3.95×10^{-3} | 0.043 |
| 5000 | 1.61×10^{-4} | 3.97×10^{-3} | 0.041 |
| 10000 | 1.58×10^{-4} | 3.97×10^{-3} | 0.04 |

Table 3. 자기장 감도 계산을 위한 parameter. Number of Images는 누적된 이미지 수이다. N_{rms} 는 CCD 카메라로부터 측정되고 평균 계산된 광학 신호의 표준 편차이며, $SITF_{slope}$ 는 시스템 신호 전달 함수의 기울기이다.

2-2. 광 흡수에 대한 MOIM의 감도

광 흡수에 대한 측정 감도를 정량화하기 위해 마이크로파의 전력 세기에 따른 광학 흡수 변화를 측정하였다. 본 측정에서 광 흡수 측정 감도는 잡음 증가 신호(NES; 식 17)를 통해 계산하였으며, ΔP 와 ΔR 를 각각 마이크로웨이브 전력의 세기 변화와 반사율 변화로 적용하였다. 또한 N_{rms} 가 누적된 이미지 수와 관련되어 있기 때문에, 본 실험 또한 1,000장, 5,000장, 그리고 10,000장까지 누적된 이미지에 따른 광학 흡수 측정을 수행하였다.

Figure. 9에 이미지 1,000장, 5,000장, 그리고 10,000장 누적하였을 때 전력의 세기에 따른 광 흡수 변화를 나타내었다. 측정 결과로부터 전력의 세기가 증가할수록 반사율이 선형적으로 감소하는 것을 확인할 수 있다.

Table. 4에 누적된 이미지 수에 따른 N_{rms} , SITFslope, 그리고 Sensitivity를 나타내었다. 계산 결과로부터, 누적된 이미지 수가 1,000장, 5,000장, 그리고 10,000장까지 증가하였을 때 N_{rms} 가 감소하는 것을 확인할 수 있으며, 이에 따라 Sensitivity가 누적된 이미지 수에 따라 $0.11 \text{ W} \cdot \mu\text{m}$ 부터 $0.07 \text{ W} \cdot \mu\text{m}$ 까지 감소하는 것을 확인할 수 있다. 따라서 본 실험 결과를 통해 Bi-YIG 박막의 두께 $1 \mu\text{m}$ 에서 측정할 수 있는 최소 전력의 세기가 $0.07 \text{ W} \cdot \mu\text{m}$ 임을 알 수 있다.

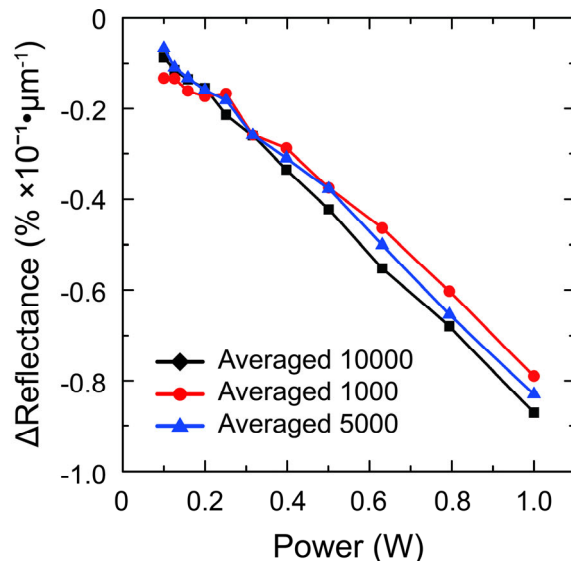


Figure 9. 광 흡수에 대한 MOIM의 감도 도선에 흐르는 마이크로파의 전력 세기에 따른 광학 흡수 변화를 나타낸 그래프이다. 검은색 선은 누적된 이미지 수가 10,000장인 경우이며, 빨간색 선과 파란색 선은 누적된 이미지 수가 각각 1,000장과 5,000장인 경우이다.

| Number of Images | N_{rms} | $SITF_{slope}$ ($W^{-1} \cdot \mu m^{-1}$) | Sensitivity ($W \cdot \mu m$) |
|------------------|-----------------------|---|------------------------------------|
| 1000 | 0.82×10^{-4} | -0.73×10^{-3} | 0.11 |
| 5000 | 0.7×10^{-4} | -0.83×10^{-3} | 0.08 |
| 10000 | 0.59×10^{-4} | -0.87×10^{-3} | 0.07 |

Table 4. 광 흡수 감도 계산을 위한 parameter. Number of Images는 누적된 이미지 수이며, N_{rms} 는 CCD 카메라로부터 측정되어 평균 계산된 광학 신호의 표준 편차이다. 또한 $SITF_{slope}$ 는 시스템 신호 전달 함수의 기울기이다.

2-3. 직류 전류의 세기에 따른 FR과 광 흡수 분포

MOIM의 가장 큰 장점은 다른 자기장 측정 장치보다 자기장의 공간적 분포를 빠르게 측정할 수 있다는 것이다. 특히 기존 연구에서, 자기장의 공간적 분포뿐 아니라 전류에 의한 열 분포를 Bi-YIG의 열 변색 효과를 통해 동시에 측정할 수 있음이 보고된 바 있다.[4] 본 연구에서는 Bi-YIG의 열 변색 효과를 통해서 마이크로파 근접장에 의해 발생하는 열의 분포를 측정하고자 한다. 그러나 직류 전류에 의해 열이 발생하면 마이크로파 근접장의 열 분포와 동시에 측정될 수 있다. 따라서 본 연구에서 직류 전류가 흐르는 도선으로부터 발생하는 열이 MOI에 직접적으로 전달되는 것을 방지하기 위해 MOI와 PCB 사이에 유리(glass; thickness: 0.1 mm)를 삽입하였다.

Figure 10(a-e)에서 PCB 회로, FR 분포를 나타내었다. FR 측정 결과(Figure 10(b))로부터, 직류 전류의 세기가 0 A인 경우 FR 분포가 공간적으로 균일한 반면, 직류 전류의 세기가 0.5 A인 경우 도선을 기준으로 좌우 영역의 FR 분포가 각각 양의 값과 음의 값으로 나타나는 것을 확인할 수 있다. 이것은 직류 전류로 인해 자기장이 발생하였고, 도선을 기준으로 좌우 영역의 자기장 방향이 서로 반대로 향한다는 것을 의미한다. 이러한 변화를 자세히 살펴보기 위해 Figure 10(c)에 도선 주변의 FR 분포를 자기장의 세기로 환산한 라인 프로파일을 나타내었다. 라인 프로파일을 통해, 도선과 가까울수록 자기장의 세기가 증가하는 것을 확인할 수 있으며, 직류 전류의 세기가 증가할수록 좌우 영역의 Peak가 커지는 것을 확인할 수 있다. 이러한 결과들은 도선에 흐르는 직류 전류에 의한 자기장의 분포를 잘 설명하고 있다.

Figure 10(d-e)에서 광 흡수 분포를 나타내었다. 광 흡수 측정 결과로부터, 직류 전류의 세기가 변화하여도 흡수 분포가 공간적으로 균일한 것을 확인할 수 있다. 이것은 직류 전류로부터 발생하는 열이 MOI로 전달되지 않는다는 것을 의미한다. 따라서 본 실험 결과로부터, 도선에 직류 전류가 흐를 때 발생하는 자기장의 세기와 방향을 MOIM의 영상화를 통해 정량적으로 구분할 수 있으며, 슬라이드 유리를 삽입하여 직류 전류의 열전달을 차단할 수 있음을 알 수 있다.

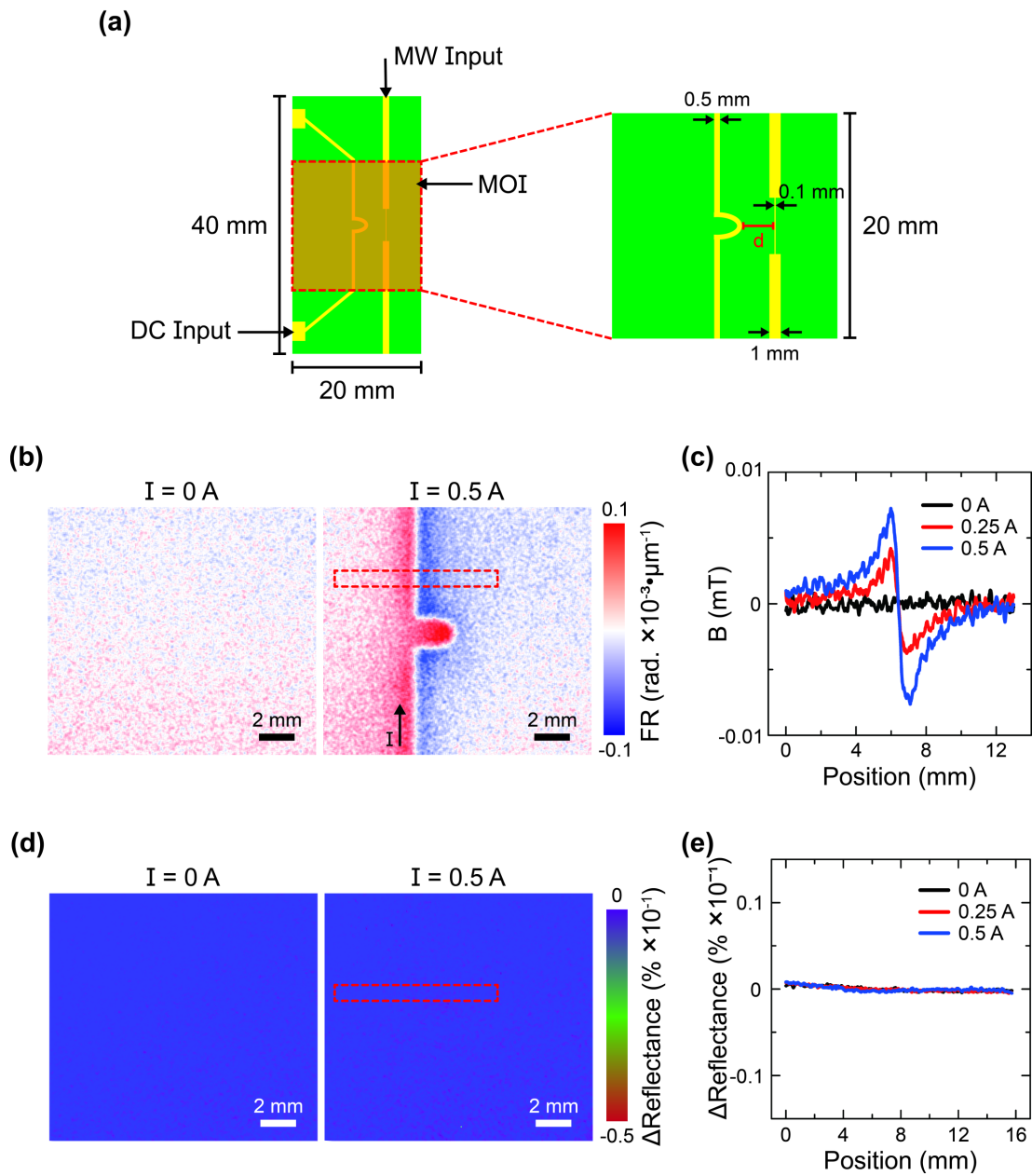


Figure 10. 직류 전류의 세기에 따른 FR과 광 흡수 동시 측정 결과 (a) 회로 기판(PCB; the printed circuit board)에 MOI를 장치로 사용한 회로 기판의 그림이다. 노란색 부분은 도체이며, 초록색 부분은 PCB의 기판이다. 그리고 주황색 사각형은 자성 광학 인디케이터(MOI; Substrate: Quartz, Material: Bi-YIG; thickness: $\sim 1 \mu\text{m}$)이다. 또한 d 는 두 도선 사이의 거리를 의미한다. (b) 직류 전류의 세기에 따른 FR 측정 결과이며, 좌측은 직류 전류의 세기가 0 A일 때, 우측은 직류 전류의 세기가 0.5 A일 때의 영상이다. 검은 화살표는 직류 전류가

흐르는 방향을 의미한다. (c) Figure 10(b) 내에서 붉은 점선 영역의 FR을 자기장의 세기로 환산한 자기 광학 영상 라인 프로파일이다. 각 선의 색은 직류 전류의 세기(검은색: 0 A, 빨간색: 0.25 A, 파란색: 0.5 A)이다. (d) 직류 전류에 따른 광 흡수 결과이며, 좌측은 직류 전류의 세기가 0 A일 때, 우측은 직류 전류의 세기가 0.5 A일 때 영상이다. (e) Figure 10(d) 내에서 붉은 점선 영역의 광 흡수를 나타낸 라인 프로파일이다. 각 선의 색은 직류 전류의 세기(검은색: 0 A, 빨간색: 0.25 A, 파란색: 0.5 A)이다.

2-4. 마이크로파의 주파수와 전력의 세기에 따른 FR과 광 흡수 분포

Figure 11(a-d)에서, 전력이 1 W인 마이크로파의 주파수에 따른 FR 분포를 나타내었다. FR 측정 결과(Figure 11(a))로부터, 마이크로파의 주파수가 변하여도 FR 분포가 공간적으로 균일한 것을 확인할 수 있다. Figure 11(a)의 FR 분포와 직류 전류에 대한 FR 분포의 차이를 정량적으로 비교하기 위해, Figure 11(b)에 도선 주변 영역의 FR을 라인 프로파일로 나타내었다. 라인 프로파일에서 직류 전류의 경우, FR 분포의 공간적인 변화가 큰 반면, 마이크로파의 경우, 주파수의 변화와 상관없이 FR 분포가 공간적으로 균일한 것을 확인할 수 있다. 이러한 결과는 도선 주위에 발생하는 자기장의 방향이 CCD 카메라의 응답 속도보다 빠른 주파수에 따라 주기적으로 전환된 것으로 설명할 수 있다.

Figure 11(c-d)에서, 전력이 1 W인 마이크로파의 주파수에 따른 광 흡수 분포를 나타내었다. 광 흡수 측정 결과로부터, 마이크로파가 흐르는 도선 위에서 광 흡수 분포의 공간적 변화가 큰 것을 확인할 수 있다. 또한, 도선 가운데 부분의 반사율이 가장 낮고, 도선에서 좌우 방향으로 멀어질수록 반사율의 크기가 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이러한 결과는 마이크로파 근접장에 의해 AI 박막에 유도 전류가 발생하여 발열되었고, 이 열이 Bi-YIG의 박막으로 전달되면서 열 변색 효과가 일어난 것을 의미하며, 도선에서 멀어짐에 따라 마이크로파 근접장 또한 약해지기 때문에 광 흡수 분포에서도 이러한 결과가 나타난 것으로 설명할 수 있다.

Figure 11(e-f)에 주파수가 2 GHz인 마이크로파 전력의 세기에 따른 광 흡수 분포와 라인 프로파일을 나타내었다. Figure 11(e)로부터, 마이크로파의 전력이 0.01 W인 경우에서 반사율 변화가 공간적으로 균일한 반면, 마이크로파의 전력이 1 W인 경우에서 도선 위의 반사율 변화가 큰 것을 확인할 수 있다. 또한 라인 프로파일(Figure 11(f))로부터, 마이크로파 전력의 세기가 증가할수록 도선 위에서 반사율 변화가 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이 결과는 전력의 세기가 증가할수록 마이크로파 근접장으로 인해 발생하는 열의 온도가 증가한다는 것을 의미한다. 본 실험의 결과로부터, Bi-YIG의 열 변색 효과를 사용하여 마이크로파의 근접장을 영상화할 수 있음을 알 수 있다.

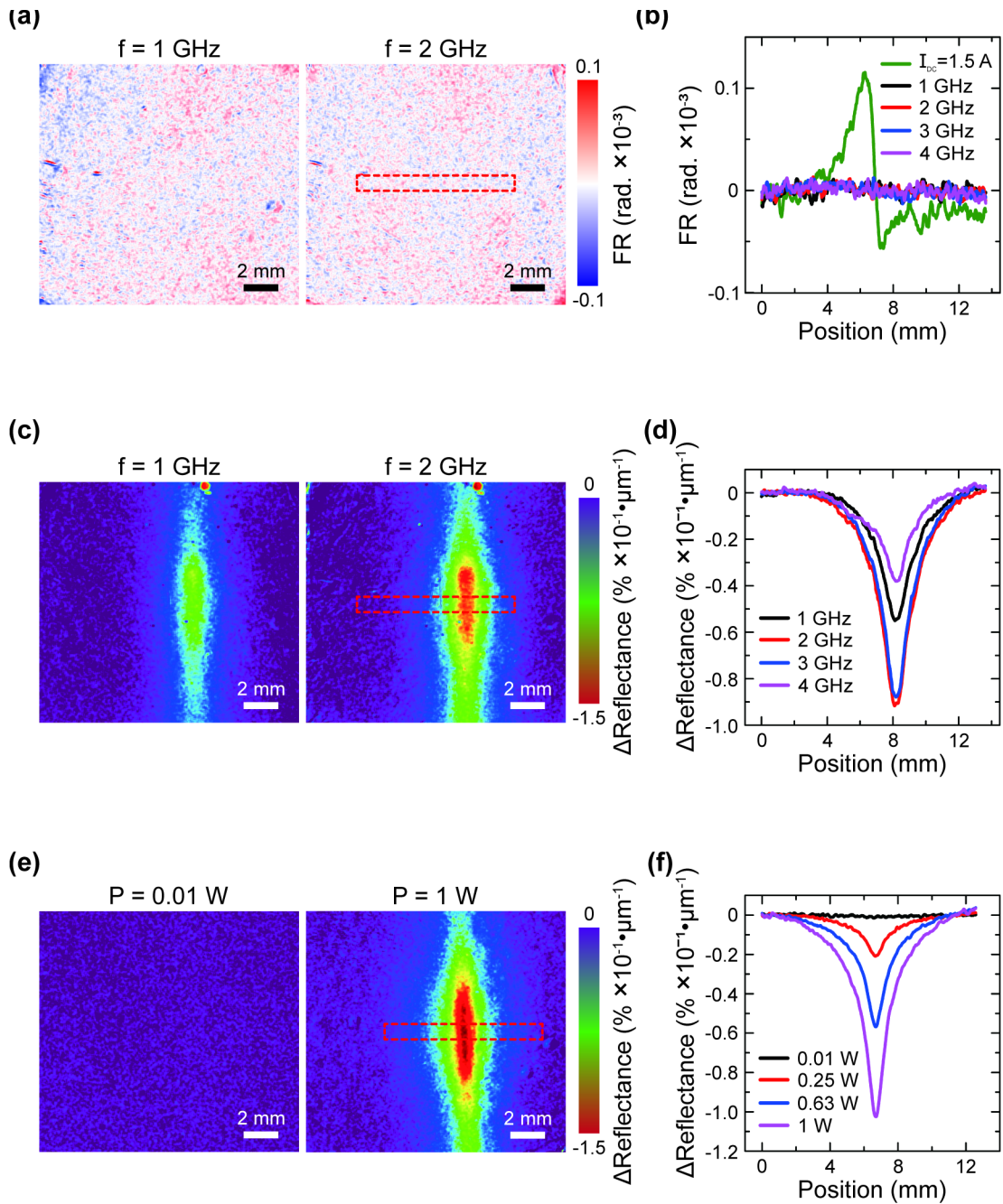


Figure 11. 마이크로파의 주파수에 따른 FR과 광 흡수 동시 측정 결과와, 마이크로파의 전력에 따른 광학 흡수 측정 결과 (a) 전력이 1 W인 마이크로파의 주파수에 따른 FR 측정 결과이며 좌측은 주파수가 1 GHz일 때, 우측은 주파수가 2 GHz일 때의 영상이다. (b) 직류 전류에 대한 FR 측정 결과와 비교하기 위한 Figure 11(a)의 붉은 점선 영역의 FR 분포 라인 프로파일이다. 초록색 선은 직류 전류의 세기가 1.5 A일 때 FR이고, 나머지 선들은 마이크로파의 주파수(검은색:

1 GHz, 빨간색: 2 GHz, 파란색: 3 GHz, 보라색: 4 GHz)이다. (c) 전력이 1 W인 마이크로파의 주파수에 따른 광 흡수 측정 결과이며 좌측은 주파수가 1 GHz일 때, 우측은 주파수가 2 GHz일 때의 영상이다. (d) Figure 11(c) 내에서 붉은 점선 영역의 광 흡수를 나타낸 라인 프로파일이다. 각 선의 색은 Microwave의 주파수 (검은색: 1 GHz, 빨간색: 2 GHz, 파란색: 3 GHz, 보라색: 4 GHz)이다. (e) 주파수가 2 GHz인 마이크로파의 전력 세기에 따른 광 흡수 측정 결과이며, 좌측은 전력의 세기가 0.01 W일 때, 우측은 전력의 세기가 1 W일 때의 영상이다. (f) Figure 11(e) 내에서 붉은 점선 영역의 광 흡수를 나타낸 라인 프로파일이다. 각 선의 색은 마이크로파의 전력 세기(검은색: 0.01 W, 빨간색: 0.25 W, 파란색: 0.63 W, 보라색: 1 W)이다.

2-5. 외부 자기장 내에서 마이크로파 근접장에 대한 FR과 광 흡수 분포

Figure 12(a-b)에 세기가 1.14 mT인 외부 자기장 내에서 주파수가 2 GHz인 마이크로파가 흐를 때 FR 분포를 나타내었다. FR 측정 결과(Figure 12(a))로부터, FR 분포가 공간적으로 균일한 상태에서, MOI 표면에 수직으로 인가하는 외부 자기장에 의해 영상 전체 영역에서 FR 변화가 나타난 것을 확인할 수 있다. Figure 12(b)에서 주파수가 2 GHz인 마이크로파의 전력 세기가 변화할 때 외부 자기장의 세기에 따른 FR의 변화를 정량적으로 나타내었다. 측정 결과로부터, FR이 외부 자기장의 세기에 따라 선형적으로 증가하는 것을 확인할 수 있으며, 마이크로파 전력의 세기가 증가하여도 기울기 차이가 없는 것을 확인할 수 있다.

Figure 12(c-d)에 세기가 1.14 mT인 외부 자기장 내에서 주파수가 2 GHz인 마이크로파가 흐를 때 광 흡수 분포를 나타내었다. 광 흡수 측정 결과(Figure 12(c))로부터, 마이크로파가 흐르는 도선 위의 반사율이 가장 낮고 도선에서 좌우 영역으로 멀어질수록 반사율이 증가하는 것을 확인할 수 있다. Figure 12(d)에 외부 자기장의 세기가 변화할 때 마이크로파 전력의 세기에 따른 광 흡수 변화를 나타내었다. 측정 결과로부터, 마이크로파 전력의 세기가 증가함에 따라 반사율의 변화가 선형적으로 감소하는 것을 확인할 수 있다. 또한 외부 자기장의 세기가 증가할 때 모든 전력의 세기에 대한 반사율이 감소하나, 기울기 차이가 거의 없는 것을 확인할 수 있다. 본 실험 결과를 통해, MOIM을 사용하여 자기장 분포와 광 흡수 분포를 영상화하는 과정에서 Bi-YIG의 FR 효과와 열 변색 효과가 개별적으로 작용하고 있음을 알 수 있다. 따라서, 외부 자기장과 마이크로파 근접장 간의 영향이 거의 없다는 것을 확인할 수 있다.

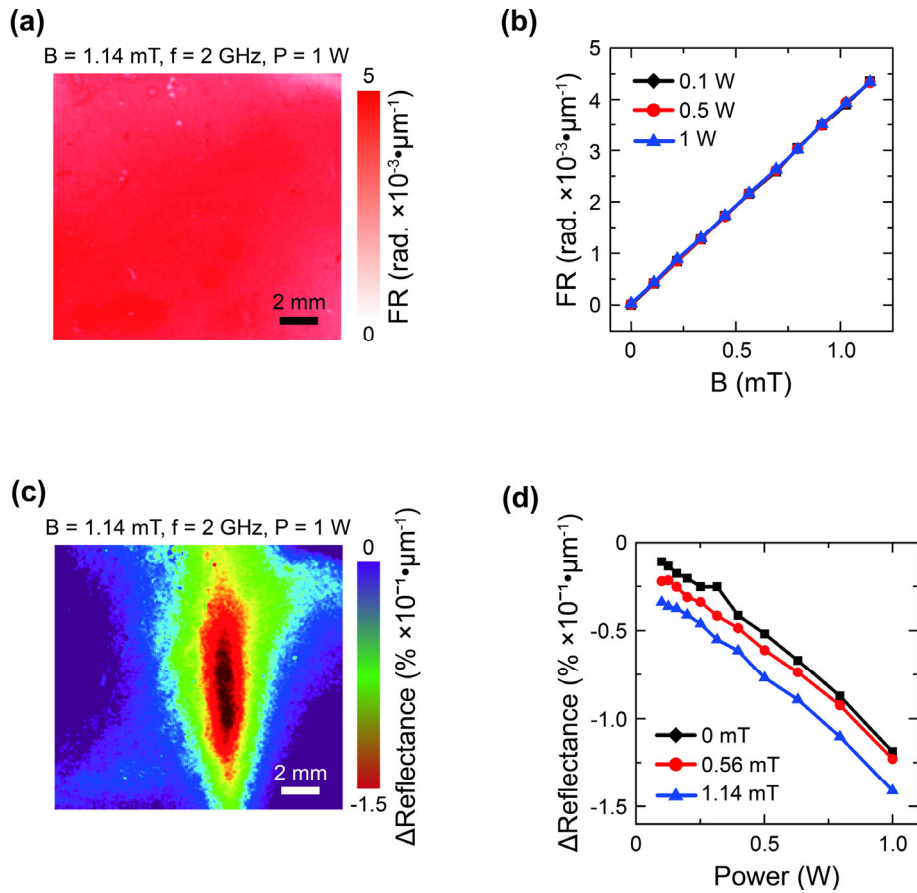


Figure 12. 외부 자기장과 마이크로파를 동시에 인가하였을 때 외부 자기장의 세기에 따른 FR과 마이크로파 전력의 세기에 따른 광학 흡수 동시 측정 결과 (a) 세기가 1.14 mT인 외부 자기장 내에서, 주파수가 2 GHz이고 전력의 세기가 1 W인 마이크로파가 흐를 때 FR 측정 결과이다. (b) 주파수가 2 GHz인 마이크로파가 흐르는 상태에서 외부 자기장의 세기에 따른 FR의 변화를 나타낸 그래프이다. 각 선의 색은 마이크로파 전력의 세기(검은색: 0.1 W, 빨간색: 0.5 W, 파란색: 1 W)이다. (c) 세기가 1.14 mT인 외부 자기장 내에서, 주파수가 2 GHz, 전력의 세기가 1 W인 마이크로파가 흐를 때 광 흡수 측정 결과이다. (d) 외부 자기장 내에서 마이크로파 전력의 세기에 따른 광 흡수의 변화를 나타낸 그래프이다. 각 선의 색은 외부 자기장의 세기(검은색: 0 mT, 빨간색: 0.56 mT, 파란색: 1.14 mT)이다.

2-6. 동시에 흐르는 직류 전류와 마이크로파 근접장에 대한 FR과 광 흡수 분포

Figure 13(a)에서 전류의 세기가 0.5 A인 직류 전류와, 주파수가 3 GHz이고 전력의 세기가 1 W인 마이크로파가 각 두 도선에서 동시에 흐를 때 FR 분포를 나타내었다. 측정 결과로부터, 직류 전류가 흐르는 도선을 기준으로 좌우 영역의 FR 분포가 각각 양의 값과 음의 값으로 나타나는 것을 확인할 수 있다. 반면에 마이크로파가 흐르는 도선 주변 영역의 FR은 공간적으로 큰 변화가 없는 것을 확인할 수 있다. 이것은 앞서 확인한 마이크로파의 FR 측정 영상으로부터 설명될 수 있다(Figure 11(c)와 11(e)). Figure 13(b)에 두 도선 주변의 FR 분포를 자기장의 세기로 환산한 라인 프로파일을 나타내었다. 라인 프로파일로부터, 자기장 분포가 두 도선 사이의 거리와 상관없이 서로 유사한 분포를 띄고 있음을 확인할 수 있다.

Figure 13(c)에서 전류의 세기가 0.5 A인 직류 전류와, 주파수가 3 GHz이고 전력의 세기가 1 W인 마이크로파가 각 두 도선에서 동시에 흐를 때 광 흡수 분포를 나타내었다. 측정 결과로부터, 두 도선의 거리에 따라 반사율 분포가 변화하는 것을 확인할 수 있다. 또한 두 도선 사이의 거리가 1 mm일 때 직류 전류가 흐르는 도선 위의 반사율이 감소한 반면, 거리가 5 mm일 때 직류 전류가 흐르는 도선 위의 반사율이 증가한 것을 확인할 수 있다. 또한 두 도선 사이의 거리가 5 mm일 때 마이크로파가 흐르는 도선 위의 반사율이 크게 감소한 것을 확인할 수 있다. 이러한 변화를 자세히 살펴보기 위해, Figure 13(d)에서 두 도선 주변의 광 흡수 분포를 라인 프로파일로 나타내었다. 라인 프로파일을 통해, 두 도선 사이의 거리가 5 mm일 때 직류 전류가 흐르는 도선 위의 반사율이 가장 높고, 마이크로파가 흐르는 도선 위의 반사율이 가장 낮은 것을 확인할 수 있다. 이러한 결과는 마이크로파의 자기적 성질로 인해 도선 간에 에너지가 상호 전달되는 coupling으로 설명될 수 있으며, 두 도선 사이의 거리가 멀어질수록 마이크로파가 흐르는 도선에서 전달되는 에너지가 감소한 것을 의미한다. 본 실험 결과를 통해, 직류 전류의 자기장 분포와 마이크로파 근접장의 분포를 개별적으로 영상화할 수 있음을 확인할 수 있으며, 전류 혹은 마이크로파가 흐르는 두

도선 사이에서 발생하는 coupling 현상 또한 광 흡수 분포 영상화를 통해 확인할 수 있음을 알 수 있다.

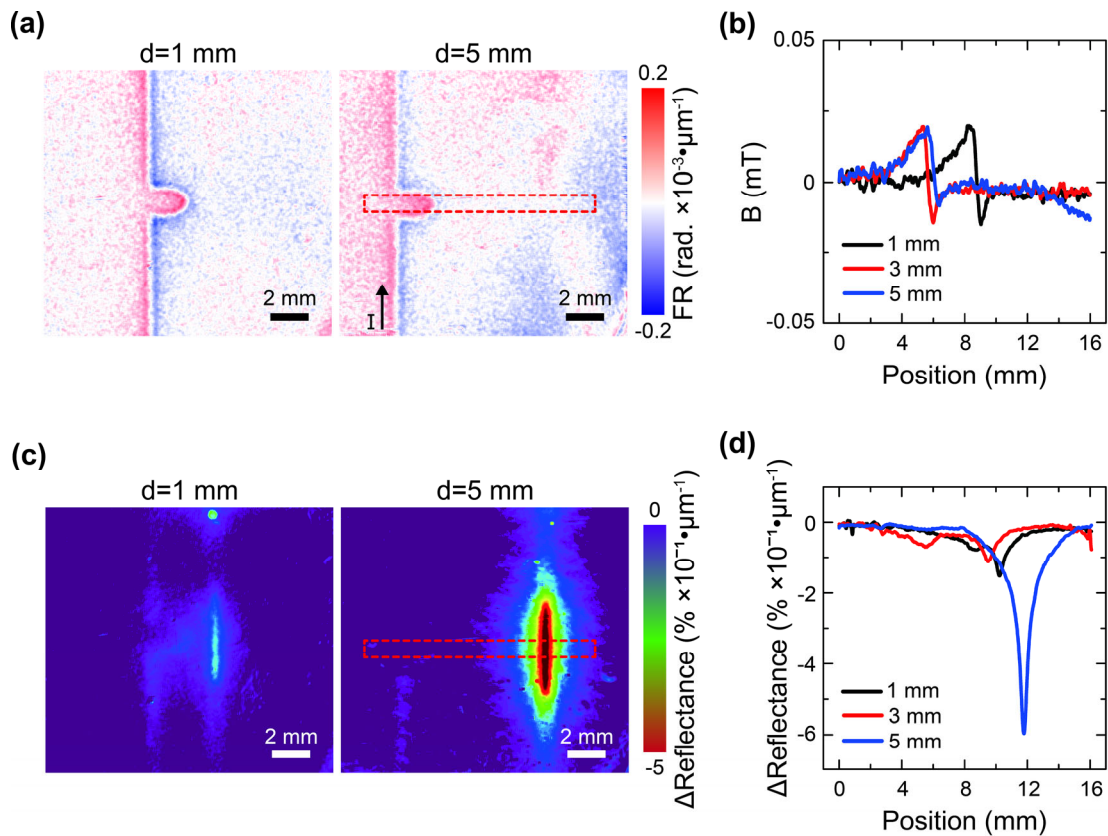


Figure 13. 직류 전류와 마이크로파를 동시에 인가하였을 때 FR과 광 흡수 동시 측정 결과 (a) 세기가 0.5 A인 직류 전류와, 주파수가 3 GHz이고 전력의 세기가 1 W인 마이크로파가 각 도선에서 동시에 흐를 때, 두 도선 사이의 거리에 따른 FR 측정 결과이다. 좌측은 도선 사이의 거리가 1 mm일 때, 우측은 도선 사이의 거리가 5 mm일 때 영상이다. 또한 검은색 화살표는 직류 전류가 흐르는 방향을 의미한다. (b) Figure 13(a) 내에서 붉은 점선 영역의 FR 분포를 자기장의 세기로 환산한 라인 프로파일이다. 각 선의 색은 두 도선 간의 거리(검은색: 1 mm, 빨간색: 3 mm, 파란색: 5 mm)이다. (c) 세기가 0.5 A인 직류 전류와, 주파수가 3 GHz이고 전력의 세기가 1W 인 마이크로파가 각 도선에서 동시에 흐를 때, 두 도선 사이의 거리에 따른 광 흡수 결과이다. 좌측은 도선 사이의 거리가 1 mm일 때, 우측은 도선 사이의 거리가 5 mm일 때 영상이다. (d) Figure. 13(d) 내에서 붉은 점선 영역의 광 흡수 분포를 나타낸 라인 프로파일이다. 각 선의 색은 두 도선 사이의 거리(검은색: 1 mm, 빨간색: 3 mm, 파란색: 5 mm)이다.

V. 결론

본 연구에서는 우수한 MOF 효과를 가진 Bi-YIG 기반 MOI를 제작하기 위한 Bi-YIG 박막 제조 방법을 연구하였고, 이어서 Bi-YIG 박막을 MOI로 사용한 MOIM을 통해 정자기장과 마이크로파 근접장을 영상화하는 연구를 수행하였다.

먼저, MOD 방법을 통해 유리 기판 위에 높은 MOF 효과가 있는 Bi-YIG 박막을 제작하기 위한 연구를 수행하였다. Bi-YIG 박막의 MOF 효과는 박막의 결정성에 따라 달라지며, 박막의 결정성이 기판의 표면 상태에 의존하기 때문에 유리 기판 위에 버퍼 층으로 사용할 Bi-YIG 박막을 증착 및 결정화한 후 Bi-YIG 박막을 성장시켰다. 그리고 Bi-YIG 박막의 결정성을 분석하기 위해 XRD를 사용하였다. XRD 분석 결과로부터 Bi-YIG 버퍼 층을 유리 기판에 먼저 성장시키는 경우(시료 A1와 B1), secondary phase의 결정 크기가 14.2 nm에서 13.2nm로 감소하고 garnet phase가 17.4 nm에서 18.8 nm로 증가한 것을 확인하였다. 또한 Bi-YIG 박막의 두께가 증가할수록(시료 B1과 B2), garnet phase가 18.8 nm에서 21.3 nm로 집중적으로 성장하는 반면, secondary phase는 13.2 nm에서 13.7 nm로 garnet phase의 성장과 달리 성장이 억제되는 것을 확인하였다. 이것은 유리 기판 위에 미리 결정화한 버퍼 층으로 인해 garnet phase 결정면이 secondary phase 결정면보다 우선적으로 성장하였음을 의미하며, 본 실험 결과로부터 유리 기판과 같은 비정질 기판 위에 Bi-YIG 박막을 성장시키는 경우, 버퍼 층을 기판 위에 먼저 성장시켜 우수한 결정성을 갖는 Bi-YIG 박막을 제작할 수 있음을 확인하였다.

다음으로, Bi-YIG 박막 제조 방법에 관한 연구 결과를 바탕으로 높은 MOF 효과와 열 변색 효과가 있는 Bi-YIG 박막에 기반한 MOI를 MOIM에 적용하여 정자기장과 마이크로파 자기장의 분포를 동시에 영상화하는 연구를 수행하였다. 두 도선이 있는 PCB를 제작한 후, 각 도선에 직류 전류와 마이크로파를 인가하여 각 도선에서 발생하는 자기장과 광 흡수 분포를 영상화하였다. 본 실험 결과로부터, MOIM의 자기장 감도가 0.04 mT um, 광 흡수 감도가 0.07 W um임을 확인하였다. 또한 정자기장 및 마이크로파 근접장 분포를 영상화하여 Bi-YIG 박막의 FR 효과와 열 변색 효과가 서로 개별적인 효과로 작용한다는 것을 확인하였으

며, 두 도선에 직류 전류와 마이크로파가 흐를 때 도선 간 coupling 또한 광 흡수 분포로 영상화할 수 있음을 확인하였다. 따라서 본 실험을 통해, Bi-YIG 기반 MOIM을 활용하여 소자 내에서 발생하는 자기장과 열, 그리고 신호 간 coupling을 영상화하여 분석할 수 있음을 확인하였다.

참고 문헌

- [1] H. Lee, et al., *J. Cryst. Growth* 329, 27 (2011).
- [2] U. Hartmann, *Annu. Rev. Mater. Sci.* 29, 53 (1999).
- [3] A. M. Chang, et al. *Appl. Phys. Lett.* 61, 1974 (1992).
- [4] H. Lee, et al. *Sci Rep.* 7, 43804 (2017). MOIM
- [5] S. B. Hélène, et al. *Inorg. Chem.* 53, 12378 (2014).
- [6] H. Lee. et al. *Sci Rep* 6, 39696 (2016).
- [7] D. Kim, et al. *J Kor Acad-Ind Coop Soc.* 18, 37-43. (2017).
- [8] Cherepanov, et al. *Phys. Rep.* 229, 81-144 (1993).
- [9] V. Sharma, et al. *J. Alloys Compd.* 748, 591-600 (2018).
- [10] T. Fakhrul, et al. *Adv. Opt. Mater* 7.13, 1900056 (2019).
- [11] H. Yu, et al. *Sci Rep.* 4, 6848 (2014).
- [12] Hernández-Gómez, et al. *phys. stat. sol. (c)*, 1, 1792-1795 (2004).
- [13] K. Sadhana, et al. *J. Mater. Sci. Mater.* 25, 5130-5136 (2014).
- [14] S.R. Nimbore, et al. *J Mater Sci* 41, 6460-6464 (2006).
- [15] P. Pintus, et al. *mat Electron* 5, 604-610 (2022)
- [16] Fakhrul, et al. *Adv. Opt. Mater* 7, 1900056 (2019).
- [17] J. Park, et al. *New Phys; Sae Mulli* 63, 1254-1258 (2013).
- [18] K. Sato, *Frontiers in Physics* 10, 946515 (2022).
- [19] M. Gaudon, et al. *Inorg. Chem.* 46, 10200-10207 (2007).
- [20] P. Kiri, et al. *Adv. Mater. Lett.* 1, 86-105 (2010).
- [21] E. Acosta, *Thin Films. IntechOpen*, Nov. 17 (2021).
- [22] J.-I. Jeong, et al. *J. Korean magn. Soc.* 21, 5. 185-192, (2011).
- [23] J. Park, et al. *New Phys.: Sae Mulli* 63, 1254-1258 (2013).
- [24] P. Görnert, et al. *phys. stat. sol. (a)*, 201, 1398-1402. (2004).
- [25] J. L. Rehspringer, et al. *J. Magn. Magn. Mater.* 211, 291-295. (2000).
- [26] T. Ishibashi, et al. *J. Appl. Phys.* 97, 013516 (2005).
- [27] R. Singh, *Applied Welding Engineering*, 3rd ed. (Butterworth-Heineman

- n, 2020), 93-96.
- [28] W. S. Kim. Korean Ind. Chem. News. 10, 5, 9-24 (2007).
- [29] Y. Baik, et al. (2008). Method for thin film growth. KR Patent No. 10-0960595B1, DC: Korean Intellectual Property Office.
- [30] H. Khan, et al. Can. J. Chem. Eng. 98, 1255-1266. (2020).
- [31] K.-G. Yim, et al. Journal of the Korean Vacuum Society, 19. 281-286. (2010).

Bi-YIG Thin Film Growth on Bi-YIG Buffer Layer,
and Simultaneous Imaging of Magnetic Field and Microwave
Near Field Distributions
by Magneto Optical Indicator Microscopy

Jihye Yang

Department of Physics
The Graduate School
Jeju National University

Abstract

Magneto-Optical Indicator Microscopy(MOIM) is a technology that utilizes the Magneto Optical Faraday(MOF) effects of the Magneto-Optical Indicator (MOI), to optically visualize the distribution of magnetic fields. The MOIM uses a CCD camera as a measurement sensor, thus it has a advantage to measure numerous signals in a short time unlike magnetic field measurement devices based on scanning probe methods. Particularly, the MOIM that applied a MOI based on Bismuth-substituted yttrium iron garnet(Bi-YIG) thin films can simultaneously measure the distribution of magnetostatic field and heat generated by electric currents. This case results from the MOF effects and temperature-dependent optical absorption changes(Thermochromism) of Bi-YIG thin film, suggesting that this technology can be utilized to nondestructive detection about the states and defects of electromagnetic devices. However, existing MOIM has limitation about imaging the rapidly changing magnetic field by high-frequency alternating current(AC) than the response speed of CCD camera. In order to overcome this limitation, this

study explored a method for simultaneous imaging magnetic field of direct current(DC) and magnetic field of high frequency AC(Microwave near field) using MOIM based on the MOF effects and Thermochromism of Bi-YIG thin films. Also, Prior to conducting this study, to produce Bi-YIG thin films with excellent MOF effects, preceding study that deposited and crystallized a 0.08 μm thickness Bi-YIG thin film($\text{Bi}_1\text{Y}_2\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ buffer layer) on glass substrate was conducted. And based on the preceding research results, a MOI based on Bi-YIG thin films was produced and applied to MOIM.

In the preceding study, the crystalline of the Bi-YIG($\text{Bi}_1\text{Y}_2\text{Fe}_5\text{O}_{12}$) thin films were analyzed using X-ray Diffraction(XRD) after the growth of the films on the buffer layer. From the XRD analysis results, these were showed that the garnet phase was more crystallized than the secondary phase. Furthermore, when increasing in the thickness of the films on the buffer layer. These were confirmed that garnet phase was showed a concentrative growth, while the growth of the secondary phase was suppressed.

Based on the preceding study, a MOI was produced and applied to MOIM to visualize the distributions of magnetostatic fields and microwave (GHz) near fields. The DC and microwave were applied to two conductor lines in a printed circuit board(PCB), respectively. And magnetic field distribution and optical absorption change(reflectance) distribution were visualized. From the imaging results, that the simultaneous images of magnetostatic fields distribution and microwave near fields distribution by the MOF effect and thermochromic of the Bi-YIG thin film were confirmed. Additionally, electromagnetic interference by the microwave near field between two conductor lines(coupling) was also measurable. These measurement results show that MOIM based on Bi-YIG thin films is crucial to analyzed the operational states and coupling within electronic components.