

令和 6 年 6 月 14 日現在

機関番号：13904  
研究種目：基盤研究(B)（一般）  
研究期間：2021～2023  
課題番号：21H01368  
研究課題名（和文）熱フォノン流制御型人工磁気格子の開発と超高密度磁気ホログラム三次元記録への応用

研究課題名（英文）Development of artificial magnetic lattice controlling thermal flow and application to three-dimensional recording of ultra-high density magnetic hologram

研究代表者  
リム パンボイ（Lim, Pang Boey）  
豊橋技術科学大学・グローバルネットワーク推進センター・教授

研究者番号：40502597  
交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,300,000円

研究成果の概要（和文）：熱流制御型人工磁気格子記録媒体の開発に関して、記録層として使用する磁性ガーネットの組成と特性の関係を詳細に調査し、希土類サイトに置換するBiの置換量を1.0以下にする材料が望ましいことがわかった。また熱流制御のための熱拡散層に拡散バリアを導入し、磁性相の結晶化条件を見直すことで、期待される磁気光学特性が得られることを見出した。高記録密度化のためのシフト多重記録の際、参照光に適切なパターンを導入することで、クロストークを抑制でき、多重記録した際のエラー率を低減できる可能性を見出した。更に開発した走査型磁気光学顕微鏡で記録した磁気ホログラムの三次元形状を推定できる可能性を見出した。

#### 研究成果の学術的意義や社会的意義

近年、流通する膨大なデジタルデータを安価かつ高記録密度に保管する記録技術が求められており、光の干渉を利用したホログラフィックメモリはその有力な候補の一つである。私たちの研究グループでは、コリニア干渉光学系を用い、記録材料として安定な磁性ガーネットを用いた磁気ホログラフィックメモリを提案してきた。本研究では磁気ホログラム記録材料として適した材料開発と熱フォノン流制御型人工磁気格子の構造設計を進めるとともに、超高記録密度実現のための多重記録方式の検討を行うことで、磁気ホログラムメモリの実現に寄与した。

研究成果の概要（英文）：Regarding the development of artificial magnetic lattice recording media controlling heat flow, we investigated in detail the relationship between the composition and properties of the magnetic garnet used as the recording layer and found that the desirable amount of Bi substitution for rare earth sites is found to be 1.0 or less. It was found that the expected magneto-optical properties could be obtained by introducing a diffusion barrier into the thermal diffusion layers for heat flow control and improving the crystallization conditions of magnetic garnet layers. For shift multiplex recording, the introduction of appropriate patterns into the reference beam was found to suppress a crosstalk and reducing the error ratio. In addition, it may be possible to estimate three-dimensional shapes of magnetic holograms from the observation results with the developed scanning magneto-optical microscope.

研究分野：ホログラフィックメモリ

キーワード：ホログラフィックメモリ 磁気ホログラム

### 1. 研究開始当初の背景

近年、流通する膨大なデジタルデータを安価かつ高記録密度に保管する記録技術が求められており、光の干渉を利用したホログラフィックメモリはその有力な候補の一つである。ホログラフィックメモリが提案されて以降、多くの研究が進められてきたが、まだ実用化には至っていない。私たちの研究グループでは、コリニア干渉光学系を用いたホログラフィックメモリを提案するとともに、記録材料として安定な酸化物である磁性ガーネットを用い、磁化の向きとして干渉情報を記録する磁気ホログラムメモリの開発を進めてきた。

多結晶の磁性ガーネット膜を記録材料として、コリニア方式でデータの記録再生ができることを見出したが、具体的にどのようにホログラムが形成されているのかは確認できておらず、今後の多重記録による高記録密度化を進めるにあたっての課題となっていた。また多重記録による高記録密度化を行うには、厚いホログラムを形成する必要があるが、記録時の熱フォノン流によって三次元磁化分布状態が破壊される課題があり、厚い多結晶磁性ガーネット膜へのホログラム形成は困難であった。

### 2. 研究の目的

本研究では上記課題を解決し、コリニア方式体積光磁気記録システムを世界に先駆け実現することを目的とし、体積磁気ホログラムの三次元磁化分布状態の解明と、その結果を踏まえ形成する熱フォノン流制御性と高い光回折効率をもつ新しい光人工磁気格子の形成、およびそれを用いた体積磁気ホログラムシフト多重境界の探求を行う。

### 3. 研究の方法

#### (1) 体積磁気ホログラムの三次元磁化分布の解明

三次元磁化分布状態の解明のため、対物レンズにより試料表面にレーザー光を集光し、磁性膜試料の面内をサブミクロンオーダーで走査し、円偏光変調法により各位置におけるファラデー回転角を測定することで、ファラデー回転角分布を観察できる走査型磁気光学顕微鏡(MO 顕微鏡)を構築した。このMO 顕微鏡を用いて、まずは二光束光学干渉法で記録した磁気フリンジを、レンズの焦点高さを変えて観察を行った。

#### (2) 光人工磁気格子の形成

光人工磁気格子の形成にあたり、熱フォノン流制御と高い回折効率実現のための多層膜記録媒体には、透光性に優れ、高いファラデー回転角を持つ磁性ガーネットが必要である。そこで、有機金属塗布熱分解(MOD)法を用いて、磁性ガーネット組成が特性に及ぼす影響について探究を行った。更にフォノン流を制御し高い特性を得るための多層膜構造についても検討した。

#### (3) 体積磁気ホログラムのシフト多重性

また体積磁気ホログラムのシフト多重記録・再生方式の検討にあたり、記録する光人工磁気格子の検討と並行してシフト多重記録時のクロストークの評価および多重記録特性の評価を行った。現在のコリニア干渉方式による記録条件では、直径約  $300\mu\text{m}$  の磁気フリンジが記録される。その記録位置から、参照光のみを少しずつ位置をシフトさせながら照射した際に、得られる再生光の強度(クロストークの大きさ)を評価した。またクロストークを抑制するため、再生時の参照光を一樣な光を用いるのではなく、白黒のパターンを入れることによる効果も評価した。また二光束干渉法を用い、記録媒体を光の入射軸の周りに回転させるペリストロフィック多重記録した際の回折効率とMO 顕微鏡による干渉縞の状態も評価した。

### 4. 研究成果

#### (1) 体積磁気ホログラムの三次元磁化分布の解明

磁気ホログラムの磁化分布を評価するため、MO 顕微鏡により二光束干渉法により記録した磁気フリンジを観察した結果、干渉縞に対応した明瞭なファラデー回転角分布が観察できることがわかった。またフリンジの中央付近と端部では回転角の大きさに差異があり、形成された干渉縞の深さの違いに起因すると考えられる違いが観察されたと考えられた。また回転角の大きさを評価した結果、磁気フリンジにおける回転角変化の大きさは、完全に磁化反転していると考えられる場合よりも小さく、浮遊磁界だけでは磁化反転が不十分であると考えられ、磁気アシスト記録が必要と考えられる。

二光束干渉法により記録した約  $0.67\mu\text{m}$  周期の磁気フリンジについて、膜表面に焦点を合わせて観察した結果を図1に示す。図のように、わずかな途切れなどが見られるものの  $0.67\mu\text{m}$  の縦縞が観察され、 $1\mu\text{m}$  以下の周期の微細な干渉縞も観察可能であることがわかった。次に膜の同じ領域を異なる

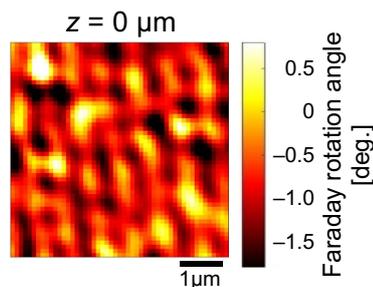


図1 周期 $0.67\mu\text{m}$ で記録した磁気干渉縞のMO 顕微鏡による観察結果。理論的に期待される微細な周期の縦縞が観察された。

焦点高さで観察を行った。この際、高さを変えた際の観察位置がサブミクロンオーダーでずれている可能性があったため、走査方法などを検討して位置ずれの影響を低減した。このように改良した手法で、周期  $2.0\mu\text{m}$  で記録した磁気干渉縞について、焦点高さを膜表面 ( $z=0\mu\text{m}$ ) と表面から  $3\mu\text{m}$  膜内部に焦点高さを変えた際の観察像を図 2 に示す。図のように、焦点高さを変えることで観察される像が変化し、焦点位置の磁化変化が最も重みづけられて観察されている可能性があることがわかった。このように、二光束干渉法で記録した磁気フリンジを焦点位置の高さを変えながら観察し、得られた結果を、単純なモデルを用いて解析することで、フリンジ形状を推定できる可能性があることがわかった。

### (2) 光人工磁気格子の形成

光人工磁気格子の記録層として適したビスマス置換希土類鉄ガーネット (Bi:RIG) の開発のため、その特性の組成依存性について検討した。希土類サイトに Bi を置換した Bi:RIG の鉄サイトを Ga あるいは Al で置換した  $\text{Bi}_{1.5}\text{Y}_{1.5}(\text{Ga or Al})_x\text{Fe}_{5-y}\text{O}_{12}$  試料のファラデー回転角の磁場依存性および消衰係数を評価した結果、どちらも置換量  $y$  が大きくなるほど、その絶対値は小さくなることわかった。更に角形性改善のため Ga あるいは Al に加え Bi:RIG の希土類サイトに Dy を置換した試料の特性を評価した結果、Dy 置換によりファラデー回転角の磁場依存性が改善し角形性が良くなることはわかったが、消衰係数は大きくなり透光性に課題が出るようになった。そこで Bi 置換量を 1.0 以下に少なくした結果、ファラデー回転角自体は小さくなるものの、消衰係数も小さくなることで性能指数は改善し、深いホログラムの形勢には有利であることがわかった (図 3)。

一方、熱フォノン流制御光人工磁気格子の熱拡散層 (HDL 層) の材料および作製プロセスについて検討をおこなった。その結果、Bi:RIG との反応性が小さく透明度が高い  $\text{SiO}_2$  を HDL 層とした場合、 $\text{SiO}_2$  膜と Bi:RIG 膜間の剥離が生じやすく、人工磁気格子形成が容易でなく成膜条件のさらなる検討が必要であった。それに対しガドリニウムガリウムガーネット (GGG) を HDL 層とした光人工磁気格子においては、多層膜を成膜中に HDL 層の Ga が Bi:RIG 層に拡散することで、Bi:RIG 層のファラデー回転角低下などが課題であったが、GGG 層と Bi:RIG 層の間に Ga 拡散を抑制するための拡散バリア層の導入を検討した結果、極薄の  $\text{Ta}_2\text{O}_5$  層を入れることで、Bi:RIG 層の特性低下を抑制できることがわかった。更に光人工磁気格子中の厚さ  $100\text{nm}$  未満の Bi:RIG 層のファラデー回転角が厚膜より小さくなる課題も見出されたが、Bi:RIG 層の結晶化熱処理温度を上げることで特性を改善できることがわかった。それらをふまえ、Ga の Bi:RIG 層への拡散を抑制するための拡散バリア層として  $10\text{nm}$  の  $\text{Ta}_2\text{O}_5$  層を入れた光人工磁気格子を作製し、その特性を評価した結果、ほぼ設計で期待されるファラデー回転角が得られることがわかり、図 3 に示すように、磁気アシスト記録をすることで単層約 1.4 倍の回折効率が得られ、熱フォノン流制御光人工磁気格子としての特性が出せることがわかった。

### (3) 体積磁気ホログラムのシフト多重性

まずペリスタロフィック多重記録により角度を変えて多重記録したところ、2 回多重記録することで回折効率は大きく低下することがわかった。多重記録した干渉縞を MO 顕微鏡で観察したところ、多重記録した部分の干渉縞形状が乱れ、本来に光束干渉法で形成される縞状の干渉縞が形成できていないことがわかった。これは磁気ホログラムの形成時の浮遊磁場が多重記録時には乱されているためと考えられ、多重記録時には磁気アシスト記録が必須であると考えられる。

次にコリニア干渉方式における、記録位置 ( $0\mu\text{m}$ ) での再生光強度で規格化した、種々の参照光

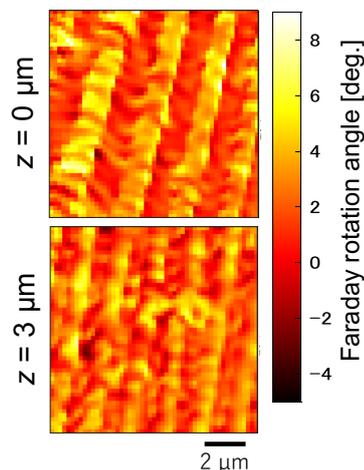


図 2  $2\mu\text{m}$  周期の磁気干渉縞の焦点を膜表面 ( $z=0\mu\text{m}$ ) にしたとき、および膜表面から膜内 ( $z=3\mu\text{m}$ ) にしたときの MO 顕微鏡による観察結果。

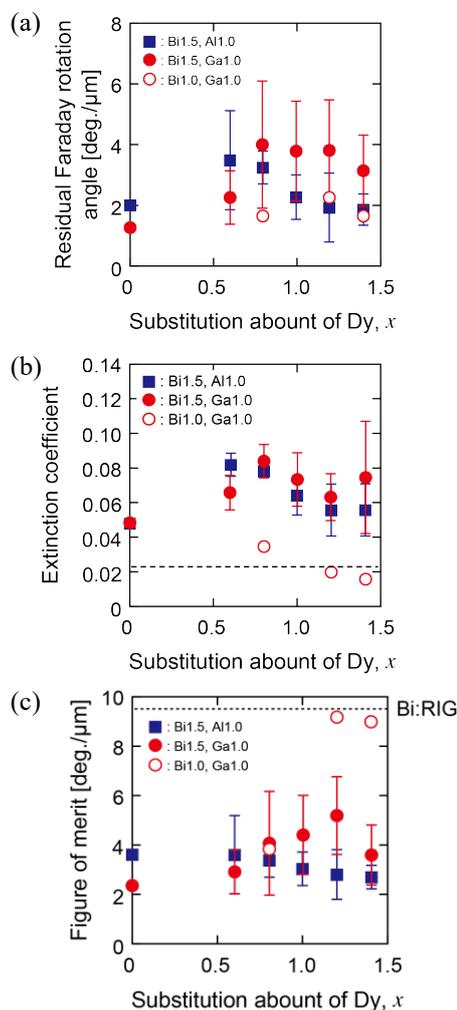


図 3  $\text{Bi}_{1.5}\text{Dy}_x\text{Y}_{1.5-x}\text{Al}_{1.0}\text{Fe}_{4.0}\text{O}_{12}$ ,  $\text{Bi}_{1.5}\text{Dy}_x\text{Y}_{1.5-x}\text{Ga}_{1.0}\text{Fe}_{4.0}\text{O}_{12}$  および  $\text{Bi}_{1.0}\text{Dy}_x\text{Y}_{1.5-x}\text{Ga}_{1.0}\text{Fe}_{4.0}\text{O}_{12}$  試料の (a) 残留ファラデー回転角、(b) 消衰係数、(c) 性能指数の組成依存性。

照射位置での光強度(クロストークの大きさ)について評価した結果を図4に示す。クロストークによる輝度は記録位置から約 50 $\mu\text{m}$  シフトした位置まで急速に減少し、その後は緩やかに低下して約 200 $\mu\text{m}$  シフトした位置でほぼ無視できるようになることがわかった。これは2~3 $\mu\text{m}$ の厚さの記録媒体を用いたため、シフト多重した際のブラッグ選択制が大きくないためと考えられる。そこで参照光に、一様な光強度のものではなく、種々の白黒パターンを導入したものをを用いて記録再生を行い、クロストークの評価をした結果、ホワイトレートが大きく適切にパターン化した参照光を用いることで、約 10 $\mu\text{m}$  シフトした位置でも光強度が再生光強度の 10%程度にまで低下できるようになり、クロストークの抑制ができることがわかった。これをふまえて、パターン化した参照光を用いてシフト多重記録を試みた結果、パターン化しない場合に比べると再生光のエラー率が改善されることがわかった。ただしまだエラー率自体は大きく、さらにエラー率を小さくできる参照光パターンの検討と、体積的に磁気ホログラムを記録するための熱フォノン流制御光人工磁気格子記録媒体を実現する必要がある。

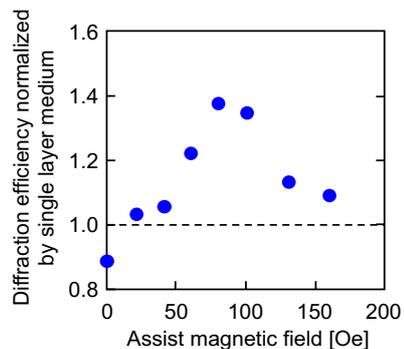


図4 単層膜の最大回折効率で規格化した拡散バリアに 10 nm の Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>を用いた熱フォノン流制御光人工磁気格子の回折効率。

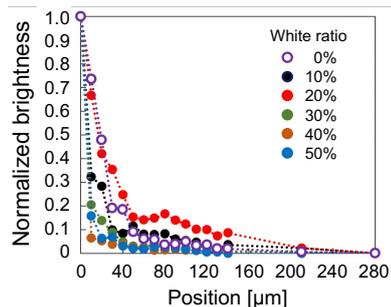


図5 種々のパターンのホワイトレートの参照光で再生した際の、クロストークによる輝度を再生光(位置 0 $\mu\text{m}$ )の輝度で規格化した結果。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計14件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 5件）

1. 発表者名 中村雄一・是川慎吾・青木英弥・水戸慎一郎・Lim Pang Boey
2. 発表標題 磁気ホログラムメモリ応用を目指した磁性ガーネット膜の作製と評価
3. 学会等名 電子情報通信学会 電子部品・材料研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 棕尾虎南・鈴木雄也・中村雄一・林 攀梅
2. 発表標題 走査型磁気光学顕微鏡による磁気干渉縞の観察
3. 学会等名 電子情報通信学会 電子部品・材料研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 鈴木雄也 棕尾虎南 中村雄一 林攀梅
2. 発表標題 走査型磁気光学顕微鏡の焦点位置が磁気干渉縞の観察結果に及ぼす影響
3. 学会等名 電子情報通信学会 電子部品・材料研究会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 ILHAM ZAKI BIN MOHD DAUD, 青木英也, SUMIKO BHARTI SINGH CHAUHAN, 穴井和音, 中村雄一, 水戸慎一郎, 林 攀梅
2. 発表標題 Bi 置換イットリウム鉄ガーネットにおける Dy および Al 置換が磁気光学特性に及ぼす影響
3. 学会等名 電子情報通信学会 電子部品・材料研究会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名	Sumiko Bharti Singh Chauhan, Bin Mohd Daud Ilham Zaki, Yuichi Nakamura, Pang Boey Lim
2. 発表標題	Effect of substitution on magneto-optical properties of Bi substituted rare earth iron garnets
3. 学会等名	電気学会 マグネティックス研究会
4. 発表年	2023年

1. 発表者名	Bin Mohd Daud Ilham Zaki, Sumiko Bharti Singh Chauhan, 穴井和音, 中村 雄一, 水戸 慎一郎, 林 攀梅
2. 発表標題	磁気ホログラムメモリ用Bi置換希土類鉄ガーネットの磁気光学特性に及ぼす元素置換の影響
3. 学会等名	電子情報通信学会 総合大会
4. 発表年	2023年

1. 発表者名	Yuichi Nakamura, Shingo Korekawa, Hideya Aoki, Shinichiro Mito, Pang Boey Lim
2. 発表標題	Effects of Al or Ga substitution on the optical properties of Bi-substituted rare earth iron garnets for magnetic hologram memory
3. 学会等名	ISOM '22 (国際学会)
4. 発表年	2022年

1. 発表者名	K. Mukuo, R. Suzuki, Y. Nakamura, and P. B. Lim
2. 発表標題	DEVELOPMENT OF OBSERVATION METHOD OF MAGNETIC INTERFERENCE FRINGES BY SCANNING MAGNETO-OPTICAL MICROSCOPY
3. 学会等名	ISOM '22 (国際学会)
4. 発表年	2022年

1. 発表者名 Konan Mukuo, Ryoya Suzuki, Yuichi Nakamura, Pang Boey Lim
2. 発表標題 Development of observation method of magnetic interference fringes by scanning magneto-optical microscopy
3. 学会等名 MORIS2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Shingo Korekawa, Yuichi Nakamura, Pang Boey Lim, Taichi Goto, Hironaga Uchida
2. 発表標題 Effect of iron site substitution on the magnetic and optical properties of Bi-substituted garnets for magnetic hologram memory
3. 学会等名 INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON IMAGING, SENSING, AND OPTICAL MEMORY (ISOM)2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Akira Yamaguchi, Kenta Tanaka, Yuichi Nakamura, Taichi Goto, Pang Boey Lim, Hironaga Uchida, Mitsuteru Inoue
2. 発表標題 Fabrication and evaluation of multilayer recording medium for volumetric magnetic hologram memory using SiO <sub>2</sub> as a thermal diffusion layer
3. 学会等名 INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON IMAGING, SENSING, AND OPTICAL MEMORY (ISOM)2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yuichi Nakamura
2. 発表標題 Development of magnetic holographic memory using artificial magnetic lattice media
3. 学会等名 日本磁気学会学術講演会 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 是川 真吾, 中村雄一, 水戸慎一郎, 林攀梅
2. 発表標題 磁気ホログラムメモリ用 Bi 置換希土類鉄ガーネットの鉄サイト置換 の影響
3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 鈴木稜也, 椋尾虎南, 中村雄一, 林攀梅, 後藤太一, 内田裕久
2. 発表標題 走査型磁気光学顕微鏡による磁気干渉縞の観察手法の開発
3. 学会等名 電子情報通信学会 電子部品・材料研究会 若手ミーティング
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	水戸 慎一郎 (Mito Shinichiro) (10637268)	東京工業高等専門学校・電子工学科・准教授  (52601)	
研究分担者	中村 雄一 (Nakamura Yuichi) (20345953)	豊橋技術科学大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授  (13904)	
研究分担者	井上 光輝 (Inoue Mitsuteru) (90159997)	豊橋技術科学大学・工学(系)研究科(研究院)・客員教授  (13904)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------