

令和 2 年 6 月 25 日現在

機関番号：12605

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2017～2019

課題番号：17H02754

研究課題名（和文）可変メタマテリアルによる立体ディスプレイ用空間光変調器

研究課題名（英文）Spatial light modulator for electronic holography based on reconfigurable metamaterial

研究代表者

岩見 健太郎（Iwami, Kentaro）

東京農工大学・工学（系）研究科（研究院）・准教授

研究者番号：80514710

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 14,400,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、裸眼電子ホログラフィの実現に向けたメタサーフェスホログラムの動画化に取り組んだ。最初の2年間でメタサーフェスによる位相変調素子の製作に取り組んだが、結果的に想定する性能が得られなかった。そこで、2019年度には別のアプローチとして、金属メタサーフェスからなるホログラムを同一基板上に複数枚配置し、それらを順次照明することで動画を投影するというキネマトグラフ型アプローチに取り組んだ。結果として、最大30フレーム毎秒の速度でホログラフィ動画を投影することに成功し、研究目的を達成することができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

裸眼の状態では立体動画を表示する裸眼電子ホログラフィは、立体ディスプレイの究極の目標である。これは空間光変調器（Spatial Light Modulator: SLM）を用いて、物体から発せられる光の波面を再現する手法である。本研究では、キネマトグラフ型と呼ばれるアプローチに取り組み、最大30フレーム毎秒の速度でホログラフィ動画を投影することに成功した。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this project was to develop animation method of computer generated holography based on optical metasurface. In the first two years, we focused onto development of reconfigurable metasurface device integrated with MEMS actuator. However, the performance of the fabricated device was not sufficient because of fabrication difficulty. Therefore, we have chosen another approach, a metasurface cinematography, in the third year. As a result, we have succeeded to reproduce holographic movie with a sufficient speed of 30 frames per second.

研究分野：マイクロ・ナノシステム

キーワード：MEMS メタサーフェス メタマテリアル 光学

## 1. 研究開始当初の背景

裸眼の状態では立体動画を表示する裸眼電子ホログラフィは、立体ディスプレイの究極の目標である。これは空間光変調器 (Spatial Light Modulator: SLM) を用いて、物体から発せられる光の波面を再現する手法である。十分な視野角を得るためには、SLM の画素となる光位相変調素子のピッチが  $1\ \mu\text{m}$  以下で、全位相 ( $360^\circ$ ) の変調範囲が求められる (NHK 佐々木ら、*映像メディア学会誌* 2014)。また滑らかなカラー動画を表現するためには、 $10\ \mu\text{s}$  以下の高速応答が必要である。

これら要求をすべて満たす SLM は実現されていない。液晶を用いる SLM は、応答時間が ms オーダで遅い。また画素サイズの限界が  $5\sim 10\ \mu\text{m}$  で、これ以上の小型化は難しい。電子スピンを利用した磁気光学 SLM では、最小画素サイズ  $300\ \text{nm}$  以下と小型で、応答速度も ns オーダと速いが、位相変調範囲が数度と狭く、透過率も 10% 程度と低い (NHK Aoshima ら、*J. Disp. Tech.*, 2015)。

一方、ナノスケールの金属平面パターンを利用したメタサーフェスによって、透過する光の位相を変換する素子が提案・実現されている。(Harvard 大 Capasso ら、*Nature Nanotech* 2015 等)。メタサーフェス光位相子は小型であるが大きな位相差を持つため、メタサーフェス光位相子の配列をホログラフィに適用する研究が世界的に進んでいる。(Tel-Aviv 大 Huang ら、*Nature Commun.* 2013, 国立台湾大 D.P. Tsai ら、*Nano Lett* 2015 等)。しかし、これらメタサーフェス光位相子には 3 つの問題点がある。(I) 金属パターンの光吸収が大きく大きな光学位相差と高い光透過率を両立できないという問題、(II) 共鳴を利用しているため使用できる波長が固定されるという問題、(III) 可動部がなく位相差が固定されているため、静止画しか表示できないという問題である。

もし、これらの問題が解決し、位相差を可変することができれば、画素が微細な空間光変調器を構成できる。これは裸眼電子ホログラフィ用空間光変調器の候補として有力と考えられる。メタサーフェスとアクチュエータを組み合わせる研究は近年盛んにおこなわれており、赤外域での電気光学変調 (Southampton 大 Zheludev ら、*Nano Lett* 2013・2014 等、香川大 山口ら、*応物秋講演会* 2015)、可視域での可変カラーフィルタ (豊橋科技大高橋・澤田ら、*Micro Nano Lett* 2014) などが報告されている。しかし、可視光範囲でメタサーフェスに  $360^\circ$  の光位相変調特性を持たせる研究はこれまで例がなかった。

## 2. 研究の目的

上記の 3 つの問題点に対し研究代表者は、(I) に関し平面的なメタサーフェスに替えて、図 1 に示すような高さを持つ金属のフィンをグレーティング状に配置したメタ材料を用いることで、開口面積を広くし 60% の高い透過率と、 $180^\circ$  の大きな位相差を両立させることに成功した。問題点 (II) に関して、金属フィン間に誘電体を挿入することで、群速度分散の偏光依存性を解消し、可視光の広い範囲内 ( $500\sim 700\ \text{nm}$ ) でフラットな位相差を示すメタ材料の開発に成功した (岩見ら、2015 秋季応物講演会)。(III) に関して、平面的なメタサーフェスに熱アクチュエータを集積化した光位相変調素子を製作し、可視光 (波長  $550\sim 680\ \text{nm}$ ) で位相差を  $10^\circ$  変調することに成功した。しかし、熱アクチュエータの場合は応答速度が遅いことが問題であった。また、フィン型メタ材料における透過光の位相は、フィン間の空隙の形状 (間隔・高さ) に応じて非常に敏感に変化することがわかった。よってこれらの成果を統合・発展させ、高速動作可能な静電駆動型シリコン振動子側壁に金ナノフィンを形成することで、上記 3 つの問題を解決する光位相変調素子を開発できると着想した。そこで、本研究では、(1) シリコン振動子側壁に形成した金属フィン構造からなる光位相変調素子の製作 (2) 素子の微細形状と光学特性の同時評価システムの構築 (3) 素子配列による空間光変調器の製作と電子ホログラフィ試験の 3 つに取り組むことを目的とした。

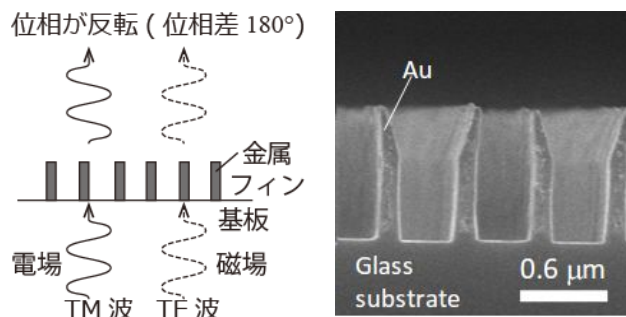


図 1 金属フィン型メタ材料の原理(左)と断面の電子顕微鏡像(右)

## 3. 研究の方法

2017 年度には、(1) シリコン振動子側面に形成する金属フィンを利用した面内駆動型光位相変調素子の設計と製作、(2) 位相変調素子の形状・光学特性同時評価のための計測システム構築、の 2 つを行った。(1) に関しては、まずデバイス設計に取り組んだ。電磁界シミュレーションを行い、製作するデバイスが所定の位相差変調範囲  $180$  度を持つ条件を確認することができ、設計解を明確化することができた。次に、ガラス基板上に表面マイクロマシニング技術と犠牲層エッチング技術によって可動構造を実際に製作することができた。さらに、側壁に堆積した

金属膜による光学位相差の発生を確認することができた。また、面外駆動型デバイスの作製もを行い、位相変調を確認することができた。(2)に関しては、干渉光学系を有する走査型偏光分解プローブ顕微鏡を製作し、メタサーフェスを透過した光の偏光状態(偏光方向と位相)を可視化する評価システムを構築することができた。このシステムでは、微小開口を有するプローブで試料表面を走査しつつ、開口からの透過光と別光路のリファレンスビームの位相差を干渉計測することによって、変更状態を完全に評価することができる。これにより、ラジアル偏光状態やアジマス偏光状態といった特異な偏光分布を可視化することが可能となった。

2018年度には、(1)面内駆動型素子の製作と評価、(2)熱アクチュエータを用いた面外駆動型素子の開発と評価(3)位相変調素子の形状・光学特性同時評価のための計測システムの高速度化、の3つを行った。(1)に関しては、前年度に設計を行ったデバイスの製作工程を見直し、歩留まり向上および製作プロセスの改善を図った。その結果、機械的に変形する素子の製作に成功し、同時に光位相変調も実験的に実証することができた。この成果をもとに、2019年度に特許を出願した。(2)に関しては、簡易な製作プロセスを立案でき、位相変調を実証することができた。特に、犠牲層エッチングのための犠牲層パターンニングプロセスを大胆に省略したことが成功につながった。構造が比較的簡易であるため、1次元的な並列制御を行いやすい構造であるため、画素化・並列化につながる重要な知見を得ることができた。この結果は英文学術論文として公表することができた。(3)に関しては、位相変調器を機械式(光学結晶)から液晶に変更することでシステムの高速度化を図った。当初意図していたほどの高速度化が達成できていないが、これは制御プログラムの見直しによりさらに向上できると考えている。また、結果として位相ノイズが安定化する可能性が示され、計測精度の向上につながった。

2019年度には、(1)位相変調素子の3次試作、(2)Bi-SNOMによる性能評価、(3)ホログラム投影用光学系の構築と試作の3課題に取り組んだ。(1)では、位相変調素子の3次試作を行った。面外駆動型・面内駆動型の2種類を製作し、位相変調特性や動特性の違いを評価・検証した。面外駆動型素子については、成膜条件の工夫による応力制御を目的とし、結果として内部応力を弱い圧縮状態とした構造において従来のデバイスよりも反りが少なく初期位相差が大きい素子を作ることになった。面内駆動型では、可動電極の本数を2本から1本に減らすことで、双方向動作を実現した。(2)では、製作された素子の性能をBi-SNOMを用いて評価することを当初予定していたが、光源の安定性等の問題があった。そこで、顕微分光装置を利用して位相変調を測定する手法に切り替えて計測を行った。所望の位相差を達成することができた。(3)では、ホログラム投影光学系を製作し、投影実験を行った。今回、マイクロデバイス型変調器では十分な位相変調性能が得られなかったため、金属メタサーフェスからなるホログラムを同一基板上に複数枚配置し、それらを順次照明することで動画を投影するというキネマトグラフ型アプローチに取り組んだ。結果として、最大30フレーム毎秒の速度でホログラフィ動画を投影することに成功した。

以上の結果から、当初想定した手法とは異なるものの、メタサーフェス技術を利用して十分な速度・解像度のホログラフィ動画を投影することができ、当初の目標を達成したといえる。

#### 4. 研究成果

本研究では、裸眼電子ホログラフィの実現に向けたメタサーフェスホログラムの動画化に取り組んだ。2017年から2018年にかけて、金属可変メタサーフェスによる位相変調素子の製作に取り組んだ。その結果、金属ナノフィンを面内変位させる素子において位相変調を達成することができた。また、位相を増加させる方向・減少させる方向の双方に動作させる双方向変調も達成することができた。しかしながら、エッチング加工等の問題で、得られた性能は当初想定した値には至らなかった。そこで、2019年度には別のアプローチとして、金属メタサーフェスからなるホログラムを同一基板上に複数枚配置し、それらを順次照明することで動画を投影するというキネマトグラフ型アプローチに取り組んだ。結果として、最大30フレーム毎秒の速度でホログラフィ動画を投影することに成功し、研究目的を達成することができた。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Shimura Takashi, Kinoshita Takuya, Koto Yuji, Umeda Norihiro, Iwami Kentaro	4. 巻 113
2. 論文標題 Birefringent reconfigurable metasurface at visible wavelengths by MEMS nanograting	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 171905 ~ 171905
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5046976	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 志村 崇、岩見 健太郎、梅田 倫弘	4. 巻 137
2. 論文標題 面外熱駆動Auナノグレーティングを用いたマイクロ光学位相子の透過率変調	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 電気学会論文誌. E, センサ・マイクロマシン部門誌	6. 最初と最後の頁 400 ~ 406
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1541/ieejsmas.137.400	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 岩見 健太郎	4. 巻 46
2. 論文標題 マイクロ・ナノ電気機械システムを利用した可変光学素子	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 光学	6. 最初と最後の頁 210 ~ 214
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Matsumoto Yuji, Takaki Yasuhiro	4. 巻 25
2. 論文標題 Time-multiplexed color image generation by viewing-zone scanning holographic display employing MEMS-SLM	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Journal of the Society for Information Display	6. 最初と最後の頁 515 ~ 523
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/jsid.600	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計10件（うち招待講演 6件 / うち国際学会 4件）

1. 発表者名 岩見健太郎
2. 発表標題 Optical Retardation Modulation Based on Mechanically Reconfigurable Au Nanograting
3. 学会等名 第9回電磁メタマテリアル講演会（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 城光寺 佑樹、安 忠烈、岩見 健太郎
2. 発表標題 側壁Au構造を用いた面内駆動型光位相差変調素子の開発
3. 学会等名 第79回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 白木 丈博、手島（石井） 美帆、安 忠烈、岩見 健太郎
2. 発表標題 ラジアル偏光子の積層化によるアライメント不要なプラズモンレンズの製作
3. 学会等名 第79回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Y. Takaki
2. 発表標題 Developments of holographic display with large screen size and viewing zone
3. 学会等名 OSJ-OSA Joint Symposia 2018（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Y. Takaki
2. 発表標題 Time-Multiplexing Techniques for Holographic Three-Dimensional Displays
3. 学会等名 The 18th International Meeting on Information Display (IMID 2018) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kentaro Iwami
2. 発表標題 A Challenge to Tunable Metamaterial Optical Retarder: Au Nanograting and its Integration with Microelectromechanical Actuators
3. 学会等名 JSAP-OSA Joint Symposia 2017 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 岩見健太郎
2. 発表標題 構造可変金ナノグレーティングによる光位相変調
3. 学会等名 レーザー学会第38回年次大会 (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 湖東 裕士、城光寺 佑樹、木下 卓哉、志村 崇、岩見 健太郎、梅田 倫弘
2. 発表標題 静電駆動金ナノグレーティングによる位相差変調
3. 学会等名 第78回応用物理学会秋期学術講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 湖東 裕士、木下 卓哉、志村 崇、岩見 健太郎、梅田 倫弘
2. 発表標題 金ナノグレーティングに生じる内部応力の調整
3. 学会等名 第65回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Y. Takaki
2. 発表標題 Viewing-zone Scanning Holographic Display Empolying MEMS-SLM
3. 学会等名 The 25th International Conference on Advanced Laser Technologies (ALT'17) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 光位相変調器	発明者 岩見健太郎、城光寺 祐樹	権利者 東京農工大学
産業財産権の種類、番号 特許、特願2019-119993	出願年 2019年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

岩見研究室ホームページ <a href="http://nmems.lab.tuat.ac.jp/">http://nmems.lab.tuat.ac.jp/</a>
--

## 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	高木 康博  (Takaki Yasuhiro)  (50236189)	東京農工大学・工学(系)研究科(研究院)・教授    (12605)	
研究分担者	梅田 倫弘  (Umeda Norihiro)  (60111803)	東京農工大学・工学(系)研究科(研究院)・理事    (12605)	