

令和 6 年 5 月 30 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21H01838

研究課題名（和文）誘電体メタ原子を用いた二重位相メタホログラムによる光波の振幅位相偏光全制御

研究課題名（英文）Simultaneous and independent control of amplitude, phase, and polarization of the optical wave by double phase meta-hologram using dielectric meta-atom

研究代表者

志村 努 (Shimura, Tsutomu)

東京大学・生産技術研究所・教授

研究者番号：90196543

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,400,000円

研究成果の概要（和文）：二種の異なるメタ原子を市松模様配置したメタサーフェスにより、二重位相ホログラフィーの原理を用いて、光波の振幅、位相、偏光の同時変調を行う原理を提案し、これを数値計算により検証した。単一種のメタ原子を用いた場合の結果を、二種のメタ原子を用いた場合に拡張する手法を開発した。またこのメタサーフェスをSiO₂基板上のSiナノ構造により実現すべく、電子ビームリソグラフィーによる製作を試みた。さらに光波の振幅、位相、偏光の同時計測を目指して、ハルトマンマスクのタルボット像による計測法を開発し、その計測精度等の実用性を検証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

メタサーフェスは実質的に光の波長程度の厚さの平面素子にも拘わらず、ホログラム、レンズ、偏光子、位相子、波長フィルターなどの機能を発現できる光学素子である。しかもこれらの複数の機能を一つの素子で実現することができる。しかしながら複数機能を持つ素子の設計には、これまではパラメータをやみくもに振って、数値計算にメタサーフェスの構造を求めるより方法がなかった。本研究により提案された、二重位相ホログラフィーの原理のメタサーフェスへの適用は、振幅変調に関してある程度解析的な設計手法を与え、メタサーフェスの設計に新しい方法論をもたらした。

研究成果の概要（英文）：A method for simultaneous modulation of the amplitude, phase, and polarization of light waves by a metasurface consisting of two different meta-atoms arranged in a checkerboard pattern is proposed based on the principle of dual phase holography, and this method is verified by numerical calculations. We developed a method to extend the results obtained with a single type of metaatoms to the case of two types of metaatoms. The metasurfaces were fabricated by electron beam lithography using Si nanostructures on SiO₂ substrates. Furthermore, we developed a method for simultaneous measurement of amplitude, phase, and polarization of light waves using Talbot images of Hartmann masks, and verified the accuracy and practicality of the measurement.

研究分野：光学

キーワード：メタサーフェス メタアトム 二重位相ホログラフィー 同時変調 振幅 位相 偏光 Si

1. 研究開始当初の背景

メタサーフェスは、メタマテリアルの2次元版として発想された。メタマテリアルは対象とする電磁波の波長よりも小さな人工的な電気双極子と磁気双極子(メタ原子)を3次的に配列することにより、自然界には無い電磁波に対する応答を持つ物質を作ることができ、透明マント、負の屈折率、完全レンズなどへの応用可能性により大きな注目を集めた。しかしながら、赤外光から可視光領域以下の波長の電磁波に対しては、波長が $1\ \mu\text{m}$ 程度以下であり、波長以下のサイズの人工的電気双極子を3次元に配列することは極めて難しい。そこで考えられたのが、メタ原子の2次元配列によるメタサーフェスである。これは単一メタ原子層によるメタマテリアルであるが、メタ原子のサイズ、形、方向等で入射電磁波に位相遅れを与えることができ、電磁波の振幅、位相、偏光等が変調できることが示された。メタ原子の単一層2次元配列であれば、半導体リソグラフィ技術を用いて、 $100\ \text{nm}$ 程度のサイズのメタ原子でも、実際に製作可能である。

当初のメタサーフェスは金属ナノ構造を用いたものであった。これは局在プラズモンによる電気双極子振動を用いて光波に位相遅延を与えるもので、効率は高かったが、金属の吸収による光波の損失が問題であった。そこで登場したのが誘電体メタサーフェスである。この場合位相遅延を与えるメカニズムは必ずしも電気双極子ではなく、ナノ構造の伝搬における速度の違い、あるいは偏光の変化に伴う幾何学的位相が有効な場合もある。これらの効果により、局在プラズモンの効果が無くても、効率の良い光波の変調が可能であることが示された。

わずか $1\ \mu\text{m}$ 程度の厚さで、大きな光波の変調ができるデバイスとして、メタサーフェスは大きな注目を集めた。しかも、原理的に光波の位相と偏光の同時変調が可能であることから、レンズ、ホログラフィー、位相子が平面素子によって実現できるデバイスということで、応用面でも注目を集めた。さらには、複数種のメタ原子を組み合わせるにより、振幅変調や波長フィルタリングも可能であることが示された。これらにより、原理的には振幅、位相、偏光の同時変調が一つのデバイスで可能であることは

しかしながら、所望の位相、偏光、振幅、波長特性を一つのメタサーフェスに発現させるためには、基本的に数値計算によりやみくもなパラメータ探索を行わねばならないのが現状で、設計は困難であり、報告例としても、位相、偏光、振幅のいずれか2つを同時に変調した例しかなかった。

そこでわれわれは、位相、偏光の変調特性が既知のメタ原子を2種組み合わせて、2重位相ホログラフィーの原理により振幅を変調するというアイデアを着想するに至った。これにより完全にやみくもなパラメータ探索に比べて、計算量を著しく低減できると予想できた。

以上により単一のメタサーフェスにより、振幅、位相、偏光を同時に変調できると考えた。

2. 研究の目的

本研究の目的は、誘電体ナノ構造によるメタ原子の2次元配列により、光波の振幅、位相、偏光が同時、かつ独立に制御できるか、を明らかにすることである。

位相と偏光が同時に変調可能であることはこの研究の開始以前から明らかになっていた。そこで本研究では2重位相ホログラフィーの原理をメタサーフェスに適用し、2つの異なる位相の光の干渉により振幅の絶対値(強度)を変調することを考えた。この考え方により、光波の振幅、位相、偏光の同時かつ独立な変調が可能であることを明らかにする。

さらにこの考え方により、メタサーフェスが設計、製作が可能であることを示す。

3. 研究の方法

(1)数値シミュレーションによる光変調量の計算

まず、数値計算によりメタサーフェスの構造と、変調される振幅、位相、偏光の関係を求めた。構造は図1に示すような、1種類のメタ原子の無限正方配列を考える。対象波長は $1.06\ \mu\text{m}$ とした。格子定数を p 、メタ原子の長辺、短辺の長さをそれぞれ W_{x1} 、 W_{y1} 、高さを h 、長軸の x 軸からの長辺の回転角を α とする。これらのパラメータを変化させて、入力光(平面波)と出力光の振幅、位相、偏光の関係を求めてテーブル化した。

続いて、図2に示すような、2種類のメタ原子が市松模様配列したメタサーフェスについて同様の計算を行った。2つの目メタ原子の長辺、短辺の長さはそれぞれ W_{x2} 、 W_{y2} 、とし、高ささと角度は単一種メタ原子の場合と同じとした。

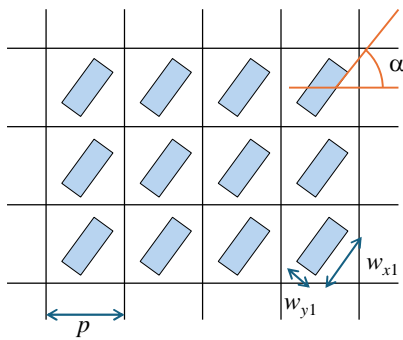


図1 単一種メタアトムからなるメタサーフェスの配列

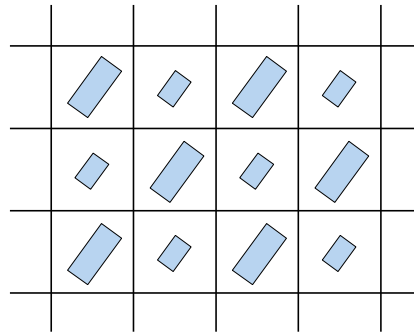


図2 2種メタアトムからなるメタサーフェスの配列

(2)電子ビームリソグラフィーによるメタサーフェスの製作

電子ビームリソグラフィーにより設計したメタサーフェスを製作した。基板は SiO_2 、メタアトムはアモルファスシリコンとした。

(3)ハルトマンマスクのタルボット像を用いた波面計測システムの開発

出来上がったメタサーフェスによる光の変調量の計測には、一つの方法としては干渉計を用いるが、もう一つ新しい方法として、被検波面が照射されたハルトマンマスクのタルボット像の変形から、波面を計測するシステムを開発する。

4. 研究成果

(1)数値シミュレーションによる光変調量の計算

まず、図1に示すような単一種メタアトムにより構成されるメタサーフェスについて、前項3(1)に示したパラメータを変化させて、出力光の振幅、位相、偏光がどの範囲で変調されるかを計算した。その結果、位相は $0 \sim 2\pi$ の全範囲で、偏光はポアンカレ球上の全域で変調が可能であるが、振幅はほぼ一定という、予想通りの結果となった。次に図2に示した二種メタアトムによるメタサーフェスにより同様の計算を行った結果、位相、偏光に加えて、振幅も入射光の振幅で規格化して $0 \sim 1$ の範囲で変調可能であることが明らかになった。

ただしこの際には、メタアトムのサイズに下限を設けなかったため、100 nm 以下のサイズのメタアトムも含まれ、実際の製造が困難であることが予想された。そこで、サイズを100 nm以上に限定した条件でパラメータを振って計算をやり直したところ、同様に単一種メタアトムの場合は位相と偏光のみ全域で、二種メタアトムの場合は振幅、位相、変調の全てで全域の変調が可能であることが明らかになった。図3に単一メタアトムによる出力光の複素振幅を示す。基本的に振幅の絶対値は1付近だが、条件によっては振幅が0付近まで低下することがあることを示している。図4に、同条件での出力光の偏光状態を示した。ポアンカレ球をメルカトル図法で展開したものである。各ラインは、メタアトムの長辺の角度 α を 30 度おきに変化させた場合だが、中間の状態取れば、ポアンカレ球の全表面をカバーすることができる。またこの場合は高さ h の不足のため各ラインが閉じていないが、これも h を増加させた場合は円（ポアンカレ球と平面の交線）が閉じる。

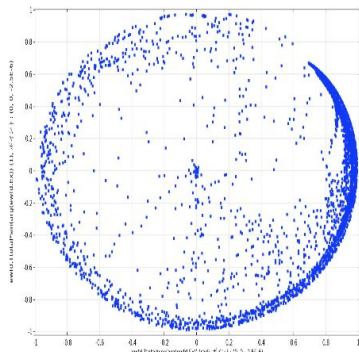


図3 単一種メタアトムによる出力光の複素振幅

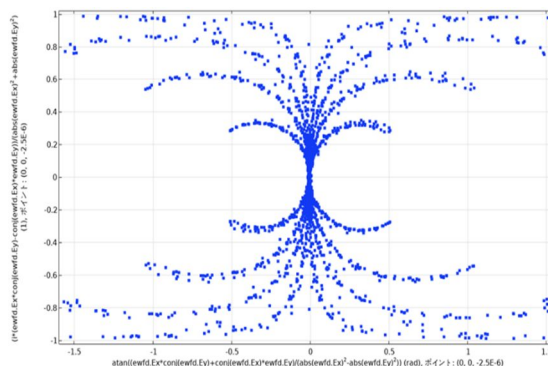


図4 単一種メタアトムによる出力光の偏光分布。各ラインは、異なる角に対応している。

(2)電子ビームリソグラフィーによるメタサーフェスの製作
通常の Si 材料の場合の電子ビームリソグラフィーのプロセスを用いて、メタサーフェスの作成を試みた。メタアトムはアモルファスシリコン、基盤は SiO_2 とした。第 1 段階の、メタアトムのサイズに下限を設けなかった場合は、サイズが 30 nm 以下になっている場合があり、作製がうまくいかなかった。これに対しサイズが 100 nm 以上である場合には比較的設計通りの形状のメタアトムが作製できた。最終的には完全な形での二種メタサーフェスの作製までは至らなかったが、作製技術は習得し、細かなノウハウの蓄積も行った。今後引き続きメタサーフェス試作は行っていく。

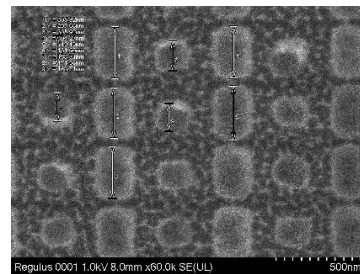


図5 二種メタアトムにより構成されるメタサーフェスの試作例 (SEM 像)

(3)ハルトマンマスクのタルボット像を用いた波面計測システムの開発

ハルトマンマスクと呼ばれる、複素透過率に 2 次元周期構造を持った透過マスクに平面波を当てると、タルボット距離と呼ばれる特定の回折距離 (具体的には 0 次回折光と 1 次回折光の軸上での位相が 2π の整数倍ずれる位置) に 2 次元周期構造を持つ強度像が現れる。入射光が平面波からわずかにずれている場合は、タルボット像にゆがみが生じ、その歪みを解析することにより、元の波面の平面波からのずれを求めることができる。通常ではこの方法では位相情報しか知ることができないが、直交する 45 度偏光子とハルトマンマスクの組み合わせにより、被検波面の振幅、位相、偏光の全てを同時に計測することができることを見出した。数値シミュレーションにより、われわれの考案した原理が正しいことを確認した。将来的にはこの計測法で上記で試作したメタサーフェスによる変調光波を計測する予定である。

(4)構造複屈折における有効屈折率 (平均屈折率) の理論がメタサーフェスでは不成立となる場合があることの検証

本プロジェクトで、二種メタアトムから構成されるメタサーフェスにより、振幅変調の範囲が 0 から 1 (入射光強度で規格化した出力振幅の絶対値) まで変調可能であるということが示されたことにより、波長より小さい構造における有効屈折率の理論が不成立となる場合があることが示された。1 次以上の回折光が発生しない条件で出力光の強度が変調できると言うことは、2 種のメタアトムから異なる位相の光波が出力されていることになる。一方有効屈折率の理論では、光の波長よりも小さな構造中の電磁波は電場あるいは電束密度に空間分布を持たないという前提で成り立っている。とすれば、強度変調は不可能なはずである。波長よりも小さい構造の中の光波の伝搬と、光波の変調に関しては、今後も継続して明らかにすべき課題である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Tsutomu Shimura
2. 発表標題 Amplitude, phase, and polarization control of light wave with double phase meta-surface
3. 学会等名 Phtorefractive Photonics and Beyond 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Tsutomu Shimura
2. 発表標題 Simultaneous Control of Amplitude, Phase, and Polarization of Optical Wave with Dielectric Metasurface
3. 学会等名 Taiwan Japan Bilateral Symposium on Photonics 2024 (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 上田 康太郎、平山 颯紀、元 志喜、藤村 隆史、田中 嘉人、志村 努
2. 発表標題 シリコンメタサーフェスにおける第二高調波発生の実現
3. 学会等名 第84回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 平山 颯紀、藤村 隆史、志村 努
2. 発表標題 メタハルトマンマスクを用いた光波の振幅・位相・偏光イメージング法の提案
3. 学会等名 第71回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2024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
研究協力者	田中 嘉人 (Tanaka Yoshito)		
研究協力者	平山 颯紀 (Hirayama Soki)		
研究協力者	鎌田 久美子 (Kamata Kumiko)		
研究協力者	上田 康太郎 (Ueda Kotaro)		
研究協力者	大村 洸翔 (Omura Hiroto)		

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
---------	---------