

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 6 年 6 月 14 日現在

機関番号：82626

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21H01851

研究課題名（和文）積層化金属ナノ構造を利用した極薄光アイソレータの研究開発

研究課題名（英文）Research and development of ultra-thin optical isolators using stacked metallic nanostructures

研究代表者

穂苅 遼平（Hokari, Ryohei）

国立研究開発法人産業技術総合研究所・エレクトロニクス・製造領域・主任研究員

研究者番号：20759998

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,500,000円

研究成果の概要（和文）：本研究の目的は、可視光域で非対称な透過現象が発現する特殊な金属ナノ構造を研究し、そのアイソレーション性能および有効波長域を定量的に明らかにすることである。ナノ印刷プロセスを用いて金属ナノパターンを形成し、繰り返し積層化する3次元カイラル構造を提案した。L字パターンの4回積層構造に対して入射する右回り円偏光と左回り円偏光の透過率の差の絶対値は、波長600 nmで約16%、波長900 nmで約41%が数値計算により得られた。作製では、積層化構造の評価には至らなかったが、そのL字構造作製プロセスの構築と積層化構造の試作により得られた知見は、今後の積層ナノ構造を利用した光制御技術に貢献するものである。

研究成果の学術的意義や社会的意義

複雑形状の3次元ナノ構造の低コスト低環境負荷作製技術は、光技術、サーマルマネジメント技術、摩擦制御、ぬれ性制御など様々な分野で重要である。特に設計した構造をナノインプリントなどの成形加工技術で実現するうえで、モールド作製技術、転写精度、成形条件、離型性などは、経験的に行っている部分が大いため、基盤研究として工程毎の現象を把握しつつプロセスを構築していくことは成形加工分野に貢献できるものである。光学分野においても、円偏光を利用したセンシングなど応用技術の研究が進んでおり、光アイソレータに関わる技術への要求も高まっている。本研究成果を基盤に、成形加工の光学応用分野の発展に貢献していく。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this study is to investigate special metallic nanostructures that exhibit asymmetric transmission phenomena in the visible light region and to quantitatively clarify their isolation performance and effective wavelength range. We proposed a 3D chiral structure in which metallic nanopatterns are formed and repeatedly stacked using a nano-printing process. The absolute values of the difference in transmittance between right- and left- circularly polarized light incident on a four-fold stacked structure with an L-shaped pattern are about 16% at a wavelength of 600 nm and about 41% at a wavelength of 900 nm, respectively, as obtained by numerical calculations. Although the fabrication did not lead to the evaluation of the stacked structure, the knowledge obtained from the construction of the L-shaped structure fabrication process and the trial fabrication of the stacked structure will contribute to future optical control technology using stacked nanostructures.

研究分野：光工学

キーワード：メタマテリアル 光アイソレータ ナノ印刷プロセス ナノインプリント 成形加工

様式 C-19、F-19-1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

サブ波長の金属構造(メタマテリアル)の光アイソレータ応用が注目されている。これらは主に金属構造の形により右回り/左回り円偏光に対する光学応答が異なることを利用している。つまり、オモテ側から見た構造の形に対してウラ側から見た構造の形が鏡像で、例えば「S」字や「N」字のような構造になっている(カイラル構造)。光源として必要な円偏光は、既存の直線偏光板と $\lambda/4$ 波長板を組み合わせたなどで作ることができるため、本技術の発展により、日常の自然光に対して機能する薄いシート状の光アイソレータが実現できる。住居、乗り物などに応用することで、次世代社会(テレワーク社会)におけるセキュリティ対策やプライバシー保護など安全・安心な暮らし、利便性の向上が期待できる。

光アイソレータに資するカイラル構造は、これまでにマイクロ波域、テラヘルツ域で多く研究されているが、近赤外域、可視域では未だ少なく、そのほとんどが理論と数値計算による研究である。その理由のひとつに、近赤外域、可視域で求められるカイラル構造が数100 nm、数10 nmの寸法要素で構成される必要があるためである。そのため、2次元上でうまく機能するカイラル構造をデザインするには制限があった。

これまでに申請者らは、ナノインプリント技術と印刷(インク充填)技術を融合したナノ印刷プロセスの研究開発を行い、可視域で機能するメタマテリアル構造をインクで形成し、その光学特性の解析など進めてきた。本技術の特長は以下の点である。

- ・数10nm線幅でアスペクト比が高い金属構造を簡単に印刷形成できる
- ・金属ナノ粒子インクを用いることで、ナノ粒子集合体パターンが形成できる
- ・繰り返し処理することで積層化できる(埋込構造のため積層化しやすい)

本技術を用いることでカイラル構造を3次的に設計・作製することができ、簡便なプロセスであることから応用展開性も備えているため、従来のメタマテリアルを用いた光アイソレータ技術の基礎研究から一歩踏み込んだ革新的アプローチとなることが期待できる。

2. 研究の目的

可視光域で非対称な透過現象が発現する特殊な金属ナノ構造を研究し、そのアイソレーション性能および有効波長域を定量的に明らかにする。

可視域用の3次元カイラル構造は、集束イオンビームデポジションを用いて作製された報告例がある。簡便な方法では、GLAD法と呼ばれる斜め真空蒸着手法によりらせん構造を作製した例が報告されている。それに対して本研究では、真空成膜工程のないナノ印刷プロセスにより金属ナノパターンの積層構造を作製し、簡単にカイラル構造の表現を拡張する。金属構造は表面の溝部に埋め込まれるように形成されるため、レイヤー表面は平坦であり、容易に積層化することができる。積層構造間のギャップはナノインプリントプロセスで生じる「残膜」を利用するため、光硬化樹脂の塗布膜厚やインプリント時の荷重で比較的均一に制御することができる。予備検討の光学シミュレーションでは、本来非対称性のない構造を回転積層することで非対称性の発現が確認できている。

3. 研究の方法

(1) 特殊な金属ナノ構造とアイソレーション性能の相関解明

本研究ではナノ印刷プロセスによる金属ナノパターンの3次元積層カイラル構造を作製し、そのアイソレーション性能および有効波長域との相関関係を明らかにする。可視域で機能する適切な3次元積層カイラル構造の設計指針を導くため、まずは数値計算(RCWA法)を用いた光学特性の解析を行う。構造の検討がついた段階で、その構造をナノ印刷プロセスでレイヤーごと形成するためのモールドを電子線描画とドライエッチングにより作製する。モールドはレイヤーごと作製するのではなく、1つのモールドの向きを90度、180度、270度と回転させて積層化していくような3次元構造を想定している。作製した積層素子に対して右回り/左回り円偏光を入射した際の光透過率スペクトルや偏光計を用いて分光特性を計測することで、アイソレーション性能を評価する。これにより、3次元積層構造と光学特性の関係性を明らかにすることができ、数値計算へのフィードバックを繰り返し行い、カイラル構造で実現可能なアイソレーション性能の範囲および有効波長範囲を明確化する。

(2) 広帯域化の検証

項目(1)で得られる構造と光学特性の相関データを利用し、広帯域化に向けた検証を行う。本手法によるメリットとして、レイヤーごとに異なる波長帯用のカイラル構造を作製して積層化することができる。これによる広帯域化の可能性、透過率への影響を評価する。

(3) 極薄光アイソレータシートの試作

項目(1)、(2)で得られた知見を利用し、透明樹脂シート上に特殊な金属ナノパターンの積層構造を作製する。曲げ状態での光学特性、入射角依存性の評価、それらの物理的現象の理解を進め、学術的に有益な知見を導く。

4. 研究成果

提案した 3 次元カイラル構造は、ナノ印刷プロセスにより形成される L 字構造の多層構造で構成される (図 1)。同じモールドを用いて、各層毎にその向きを変えながらナノインプリントとナノ粒子インクのパターンニングを行うものである。厳密結合波解析法による光学設計に基づいて、図 2 に示すモールドを用いて、L 字構造を作製した。可視光域から近赤外域での機能実現のため、L 字構造のピッチは 200 nm、300 nm、400 nm とした。Ag ナノ粒子インクの種類、印刷条件、焼成条件により、焼成後の L 字構造の構成を制御することができることが分かった。

次に、構築した L 字構造の作製プロセスを用いて、L 字構造の積層化検討を行った。ナノ印刷プロセスはスキージなど表面接触があり、表面のぬれ性などが変化していることから、1 層目の上に 2 層目をナノインプリントで形成する際の離型工程が課題であった。そこで、フィルムモールドを用いてその離型処理手法を改良することにより、積層化工程の離型性が向上し、必要な凹構造を転写形成することができた。しかしながら、表面接触のあるナノ印刷プロセスによる積層化は、層を重ねるにつれてナノ粒子構造による散乱やナノ印刷プロセスでの表面接触などに起因する拡散によるヘイズが増大することが実験的に分かった。そこで、印刷ではなく、斜め蒸着法を用いた検討を行った。これにより印刷プロセスと同様にエッチング工程なしで L 字構造を形成することができ、また非接触なドライプロセスであることから、積層化にも適していると判断した。

プロセスの改良により、3 次元カイラル構造の改良設計を行った。最終的には、L 字構造の例では、図 3 に示すように、1 層では入射光が右回り円偏光と左周り円偏光の透過率の差の絶対値はほぼ 0 であったが、90 度ずつ回転積層することで、3 層ときには波長 600 nm 付近で約 14%、波長 900 nm 付近では約 36% が得られ、4 層のときには波長 600 nm 付近で約 16%、波長 900 nm 付近では約 41% が得られた。実験では、斜め蒸着プロセスに対応するため L 字凹型のモールドを作製し、ナノインプリントにより転写された L 字凸型樹脂パターンを形成した。蒸着工程において、シャドウ効果から見積もられた蒸着角で蒸着処理を行うことで、凸パターン上部にのみ金属膜を形成することができた (図 4)。ナノ印刷プロセスと比べて、表面に接触することがなく作製できるため、UV 硬化樹脂の積層化工程の離型不良を抑えることができ、今後の積層ナノ構造を利用した光制御において有用な知見が得られた。

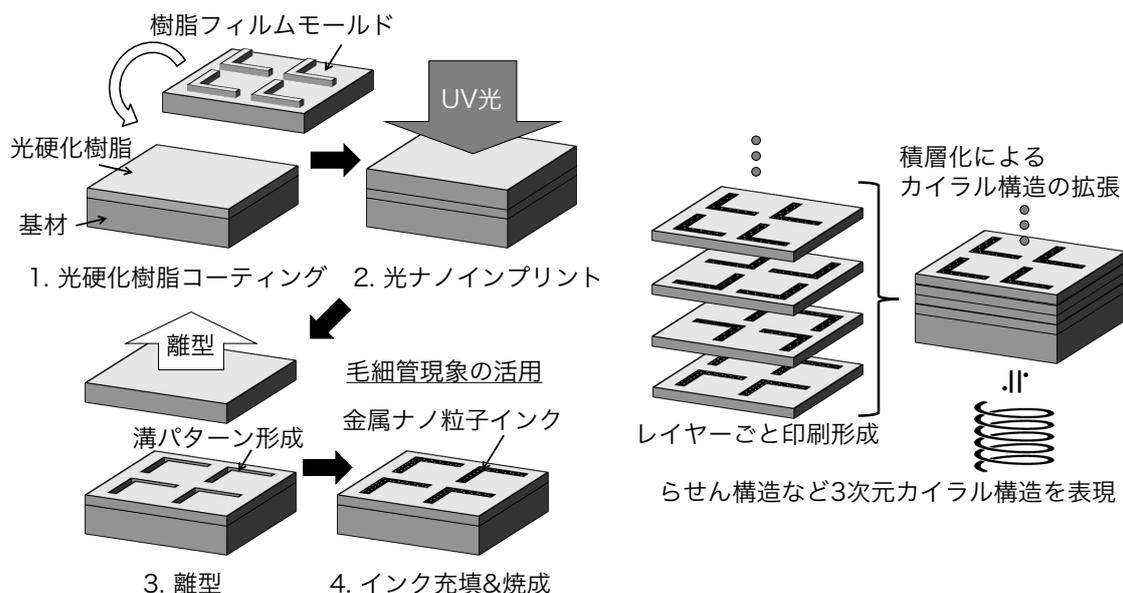


図 1 提案する 3 次元カイラル構造とその作製プロセス

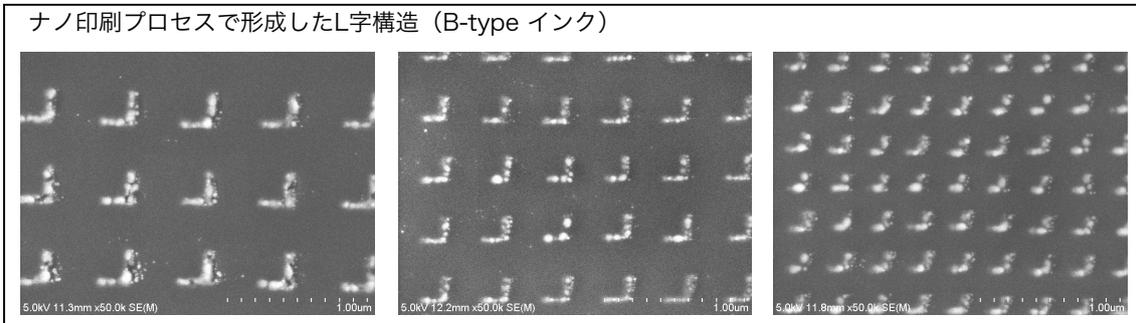
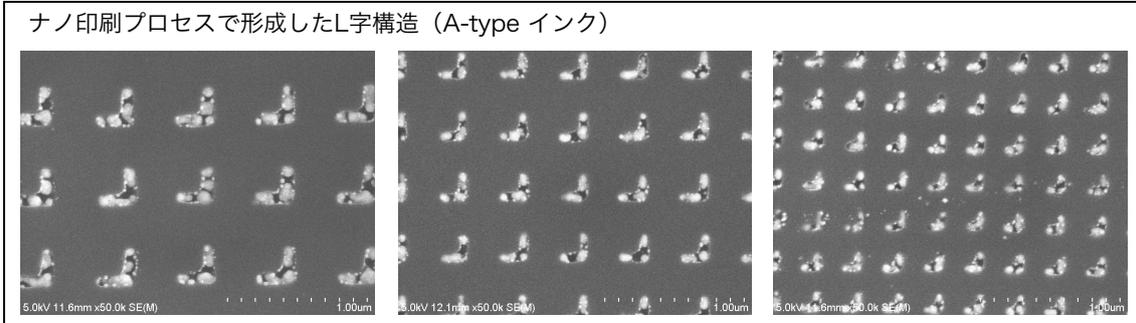
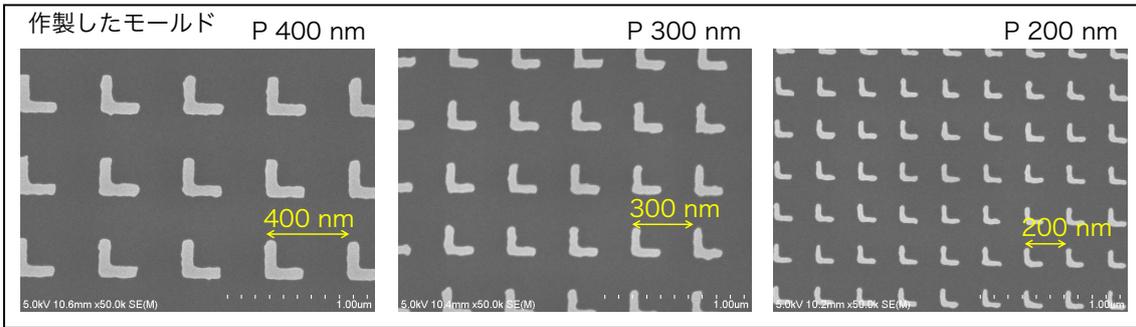


図2 ナノ印刷プロセスにより作製したL字構造のSEM画像

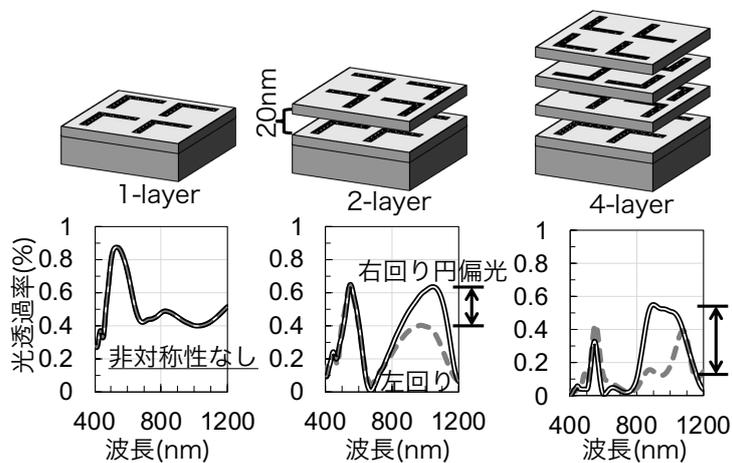


図3 数値計算による積層型L字構造の光学特性

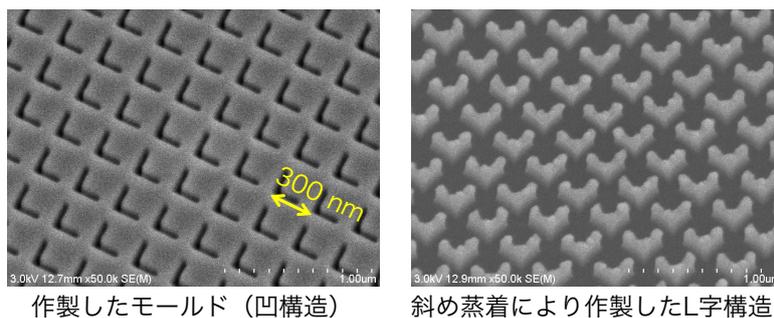


図4 斜め蒸着により作製したL字構造のSEM画像

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 1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 Hokari Ryohei, Takakuwa Kyohei, Shiimoto Kengo, Kuwano Genki, Kurihara Kazuma	4. 巻 13
2. 論文標題 Development and analysis of a nano-triangular wave-shaped polarizer	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 13387
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41598-023-40511-z	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 穂苅遼平、桑野玄気、栗原一真	4. 巻 39
2. 論文標題 射出成形でも製造できるワイヤグリッド偏光素子	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 型技術	6. 最初と最後の頁 66-69
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 無
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5件（うち招待講演 2件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 穂苅遼平、栗原一真
2. 発表標題 ナノインプリントとナノ粒子を利用した光学素子の研究開発
3. 学会等名 プラスチック成形加工学会 第33回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 穂苅遼平、栗原一真、桑野玄気
2. 発表標題 射出成形でも製造可能な新しい偏光素子
3. 学会等名 生産技術開発センター2023年度講演会（中部大学）（招待講演）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 穂苅遼平、桑野玄気、栗原一真
2. 発表標題 射出成形でも製造可能な独自ナノ構造を利用したワイヤグリッド偏光素子
3. 学会等名 第5回ナノ茶論オンラインセミナー（招待講演）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 荒井権月、穂苅遼平、栗原一真、谷口淳
2. 発表標題 Fabrication of a high aspect ratio electroformed mold through thermal nanoimprinting process
3. 学会等名 The International Conference on Leading Edge Manufacturing/Materials&Processing (LEM&P 2023)（国際学会）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 荒井権月、穂苅遼平、栗原一真、谷口淳
2. 発表標題 ニッケル電鍍モールドの作製における熱インプリントと真空スパッタ方法の検討
3. 学会等名 2023年第2回ナノインプリント技術研究会
4. 発表年 2023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	鈴木 健太 (Suzuki Kenta) (60709509)	国立研究開発法人産業技術総合研究所・エレクトロニクス・製造領域・主任研究員 (82626)	

6. 研究組織（つづき）

	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	栗原 一真 (Kurihara Kazuma) (90392612)	国立研究開発法人産業技術総合研究所・エレクトロニクス・製造領域・研究主幹 (82626)	

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