

論文の内容の要旨

論文題目	光領域で片側円偏光透過・片側円偏光吸収を示すキラルメタマテリアル
学位申請者	古澤 岳

片側円偏光透過・片側円偏光吸収を示す円偏光フィルタは、ディスプレイの視認性を向上させる反射防止フィルタや、アミノ酸などの光学異性体を持つ分子構造の同定など、様々な応用が見込める。しかし、従来方法では薄型化に限界があり、折り畳みスマートフォンなどの曲面ディスプレイに適用できない問題や、分子構造の特徴がよく表れる遠赤外などの長波長領域では円偏光フィルタが存在しない問題がある。そのため、新しい円偏光フィルタが望まれている。本研究では、右円偏光と左円偏光に対して異なる誘電率を示す人工材料であるキラルメタマテリアルに注目し、円偏光フィルタに応用可能な片側円偏光透過・片側円偏光吸収を示すキラルメタマテリアルの実機実証に取り組んだ。

キラリティとは、人間の右手と左手のように、自らの構造の鏡像が、自身と並進操作および回転操作では互いに重なり合わないような性質のことをいう。キラリティを持つ構造はキラル構造と呼ばれる。自然材料のキラル構造は、アミノ酸などの立体的な分子構造に多く見られる。人工的なキラル構造でよく見られるのは、金属の立体らせん構造である。金属キラル構造をサブ波長スケールでアレイ化したものは、キラルな特性を持ったバルク材料として振る舞うため、キラルメタマテリアルと呼ばれる。キラル構造は全て、円二色性と呼ばれる右円偏光および左円偏光それぞれに対してそれぞれ異なる誘電率を示す性質を持つ。キラルメタマテリアルの円二色性は自然材料よりも遥かに強いため、薄型の円偏光フィルタへの応用可能である。

キラルメタマテリアルの先行研究では、片側円偏光透過・片側円偏光反射を示す円偏光フィルタおよび片側円偏光反射・片側円偏光吸収を示すメタミラーは実機実証されている。しかし、片側円偏光透過・片側円偏光吸収を示すキラルメタマテリアルの実機実証は未達成である。理由は、キラル構造を90°回転ごとに対称になる4回回転対称で配置しなければならず、光領域で動作するようなマイクロナスケールの微小構造をそのように配置することが技術的に困難だからである。そのため、電波領域でミリスケールのキラルメタマテリアルを用いて片側円偏波透過・片側円偏波吸収を実機実証した例はあるが、光領域ではシミュレー

ション調査の報告のみである。また、電波領域と光領域では、金属の誘電率の振る舞いが異なるため、電波領域のキラルメタマテリアルの設計論を光領域にそのまま適用できない。そのため、光領域で片側円偏光透過・片側円偏光吸収を示すキラルメタマテリアルを実機実証することに新規性がある。

本研究では、光領域で片側円偏光透過・片側円偏光吸収を達成するために、光領域で強い円二色性を示すキラル構造を90度回転ごとに対称になる4回回転対称配置にしたキラルメタマテリアルを提案する。マクスウェル方程式やジョーンズ行列法を用いて片側円偏光透過・片側円偏光吸収特性を達成するために必要な条件を抽出し、キラルメタマテリアルを設計した。有限要素シミュレーションを用いて提案方法の片側円偏光透過・片側円偏光吸収特性を評価した。提案する片側円偏光透過・片側円偏光吸収を示すキラルメタマテリアルは、フォトリソグラフィを用いて製作した。提案するキラルメタマテリアルは金の厚膜マイクロ構造で構成されているため、1層のフォトレジストのみではパターンニングできない。フォトレジストの下に現像液に溶解する中間犠牲層を導入してレジストパターンを厚膜化し、金の厚膜マイクロ構造を製作した。テラヘルツ時間領域分光法を用いて遠赤外領域におけるデバイスの円二色性を計測し、光領域での片側円偏光透過・片側円偏光吸収を実機実証した。

本研究では、発展的な取り組みとして、可視光領域で片側円偏光透過・片側円偏光吸収特性を達成するために必要な、可視光領域で強い円二色性を示す立体らせん状金ナノキラル構造の製作に取り組んだ。立体らせん状金属ナノキラル構造の製作には、真空蒸着法をベースにしたGlancing angle deposition (GLAD)を採用した。GLADでは、真空中でターゲット基板を保持している回転ステージを極低温に冷却しながら、ターゲット基板に対して金の蒸気をほぼ垂直の角度から照射する必要がある。そこで、そのような条件を満たす真空蒸着装置から行き、デバイスを製作した。製作した立体らせん状金ナノキラル構造デバイスの円二色性を円二色性分散計で計測し、可視光領域で強い円二色性を示すことを確認した。この結果から、立体らせん状金ナノキラル構造を4回回転対称に配置することで片側円偏光透過・片側円偏光吸収が得られることが見込める。

本研究の取り組みをまとめると、フォトリソグラフィを用いて製作したデバイスで、光領域である遠赤外領域で片側円偏光透過・片側円偏光吸収を示すキラルメタマテリアルを実機実証し、発展的な取り組みとして、真空蒸着法をベースとした方法でナノサイズのキラル構造を製作し、可視光での動作に必要な円二色性を達成した。

論文審査の結果の要旨

学位申請者氏名 古澤 岳

審査委員主査 菅 哲朗

委員 青山 尚之

委員 金森 哉吏

委員 庄司 暁

委員 新竹 純

(*自筆署名の場合に限り、押印省略可)

片側円偏光透過・片側円偏光吸収を示す円偏光フィルタは、ディスプレイの視認性を向上させる反射防止フィルタや、アミノ酸などの光学異性体を持つ分子構造の同定など、様々な応用が見込める。しかし、従来方法では薄型化に限界があり、折り畳みスマートフォンなどの曲面ディスプレイに適用できない問題や、分子構造の特徴がよく表れる遠赤外などの長波長領域では円偏光フィルタが存在しない問題がある。そのため、新しい円偏光フィルタが望まれている。本研究では、右円偏光と左円偏光に対して異なる誘電率を示す人工材料であるキラルメタマテリアルに注目し、円偏光フィルタに応用可能な片側円偏光透過・片側円偏光吸収を示すキラルメタマテリアルの実機実証に取り組んだ。

キラリティとは、人間の右手と左手のように、自らの構造の鏡像が、自身と並進操作および回転操作では互いに重なり合わないような性質のことをいう。キラリティを持つ構造はキラル構造と呼ばれる。自然材料のキラル構造は、アミノ酸などの立体的な分子構造に多く見られる。人工的なキラル構造でよく見られるのは、金属の立体らせん構造である。金属キラル構造をサブ波長スケールでアレイ化したものは、キラルな特性を持ったバルク材料として振る舞うため、キラルメタマテリアルと呼ばれる。キラル構造は全て、円二色性と呼ばれる右円偏光および左円偏光それぞれに対してそれぞれ異なる誘電率を示す性質を持つ。キラルメタマテリアルの円二色性は自然材料よりも遥かに強いため、薄型の円偏光フィルタへの応用可能である。

キラルメタマテリアルの先行研究では、片側円偏光透過・片側円偏光反射を示す円偏光フィルタおよび片側円偏光反射・片側円偏光吸収を示すメタミラーは実機実証されている。しかし、片側円偏光透過・片側円偏光吸収を示すキラルメタマテリアルの実機実証は未達成である。理由は、キラル構造を90°回転ごとに対称になる4回回転対称で配置しなければならず、光領域で動作するようなマイクロナノスケールの微小構造をそのように配置することが技術的に困難だからである。そのため、電波領域でミリスケールのキラルメタマテリアルを用いて片側円偏波透過・片側円偏波吸収を実機実証した例はあるが、光領域ではシミュレーション調査の報告のみである。また、電波領域と光領域では、金属の誘電率の振る舞いが異なるため、電波領域のキラルメタマテリアルの設計論を光領域にそのまま適

用できない。そのため、光領域で片側円偏光透過・片側円偏光吸収を示すキラルメタマテリアルを実機実証することに新規性がある。

本研究では、光領域で片側円偏光透過・片側円偏光吸収を達成するために、光領域で強い円二色性を示すキラル構造を90度回転ごとに対称になる4回回転対称配置にしたキラルメタマテリアルを提案する。マクスウェル方程式やジョーンズ行列法を用いて片側円偏光透過・片側円偏光吸収特性を達成するために必要な条件を抽出し、キラルメタマテリアルを設計した。有限要素シミュレーションを用いて提案方法の片側円偏光透過・片側円偏光吸収特性を評価した。提案する片側円偏光透過・片側円偏光吸収を示すキラルメタマテリアルは、フォトリソグラフィを用いて製作した。提案するキラルメタマテリアルは金の厚膜マイクロ構造で構成されているため、1層のフォトレジストのみではパターンニングできない。フォトレジストの下に現像液に溶解する中間犠牲層を導入してレジストパターンを厚膜化し、金の厚膜マイクロ構造を製作した。テラヘルツ時間領域分光法を用いて遠赤外領域におけるデバイスの円二色性を計測し、光領域での片側円偏光透過・片側円偏光吸収を実機実証した。

本研究では、発展的な取り組みとして、可視光領域で片側円偏光透過・片側円偏光吸収特性を達成するために必要な、可視光領域で強い円二色性を示す立体らせん状金ナノキラル構造の製作に取り組んだ。立体らせん状金属ナノキラル構造の製作には、真空蒸着法をベースにしたGlancing angle deposition (GLAD)を採用した。GLADでは、真空中でターゲット基板を保持している回転ステージを極低温に冷却しながら、ターゲット基板に対して金の蒸気をほぼ垂直の角度から照射する必要がある。そこで、そのような条件を満たす真空蒸着装置から行き、デバイスを製作した。製作した立体らせん状金ナノキラル構造デバイスの円二色性を円二色性分散計で計測し、可視光領域で強い円二色性を示すことを確認した。この結果から、立体らせん状金ナノキラル構造を4回回転対称に配置することで片側円偏光透過・片側円偏光吸収が得られることが見込める。

本研究の取り組みをまとめると、フォトリソグラフィを用いて製作したデバイスで、光領域である遠赤外領域で片側円偏光透過・片側円偏光吸収を示すキラルメタマテリアルを実機実証し、発展的な取り組みとして、真空蒸着法をベースとした方法でナノサイズのキラル構造を製作し、可視光での動作に必要な円二色性を達成した。

以上のように、本論文では、円偏光フィルタに応用可能な片側円偏光透過・片側円偏光吸収を示すキラルメタマテリアルの実機実証を実現しており、片側円偏光透過・片側円偏光吸収の設計条件を導出し、実際に提案構造を試作し赤外線領域で円二色性の実証を達成した。さらに、可視光領域で強い円二色性を示す、立体らせん状金ナノキラル構造を実現した。本研究は新規性・実用性ともに優れており、よって、本論文は博士（工学）の学位論文として十分な価値を有するものと認める。