



学校法人 桐蔭学園

桐蔭横浜大学

令和2年11月12日

科学技術振興機構 (JST)

Tel: 03-5214-8404 (広報課)

桐蔭横浜大学

Tel: 045-974-5605 (研究推進部)

フィルターなしで円偏光を高感度に検出 ～応力など物体表面の可視化技術として期待～

ポイント

- 物体表面の応力分布などを可視化するために、円偏光を高感度に検出する技術が求められていた。
- 鉛ペロブスカイト系化合物と光学活性有機分子からなる結晶薄膜により、円偏光を高感度に検出するフォトダイオードを開発した。
- 偏光検出装置の高感度化、小型化や新たなセンシング技術への展開が期待される。

JST 戦略的創造研究推進事業において、JSTの石井 あゆみ さきがけ専任研究者 (桐蔭横浜大学 大学院工学研究科 特任講師) は、鉛ペロブスカイト系化合物に有機キラル分子を導入した結晶薄膜により、フィルターなしで円偏光を検出するフォトダイオードを開発しました。

物体表面の傷、異物、ゆがみなどを可視化するために、光の振動方向「偏光」を検出する技術があります。さらに、偏光した光が左右に回転する「円偏光」を検出すると、応力の強度や分布も識別できます。

現在カメラや光センサーなどの光検出部に使われているフォトダイオードは、偏光を直接識別できないので、各種のフィルターと組み合わせ、光を空間的に分離する必要があります。このような素子構造のため光の検出感度が低く、特に円偏光の検出は非常に困難です。そこで、偏光をフィルターレスで検出できるセンサーの開発が望まれていました。

本研究では、鉛ペロブスカイト系化合物と、右手と左手のように重ね合わせることができない掌性 (キラリティ) を持つ有機分子からなる有機-無機ハイブリッドのキラル結晶薄膜を作製し、その1次元鎖状構造のらせん方向によって左右の円偏光を選択的に吸収できることを明らかにしました。さらに、これを用いて作製したフォトダイオードで、円偏光の回転方向をフィルターレスでは世界最高の感度で検出することに成功しました。

これまで可視化できなかった物体の情報や応力の認識など、新しいセンシング技術としてさまざまな可能性が期待されます。

本研究成果は、2020年11月11日 (米国東部時間) に国際科学誌「Science Advances」のオンライン版で公開されます。

本成果は、以下の事業・研究領域・研究課題によって得られました。

戦略的創造研究推進事業 個人型研究 (さきがけ)

研究領域: 「光の極限制御・積極利用と新分野開拓」

(研究総括: 植田憲一 電気通信大学 名誉教授)

研究課題名: 「有機-無機ハイブリッド界面を利用した一光子センシング技術の創出」

研究者: 石井 あゆみ (桐蔭横浜大学 大学院工学研究科 特任講師)

研究実施場所: 桐蔭横浜大学

研究期間: 平成29年10月～令和3年7月

<研究の背景と経緯>

光には、明るさ（強度）や色（波長）の他に偏光（振動方向）がありますが、人が見ている光の情報は限られていて、偏光を識別することはできません。偏光を検出すれば、人の目では捉えられないさまざまな情報を得られます。例えば、特定の方向に振動する直線偏光を検出すると、物体表面の傷、異物、ゆがみなどを可視化できます。さらに、偏光した光が左右に回転する円偏光を検出すると、応力の強度や分布も識別できます。

物体表面の構造や性質などを可視化する技術として、光の偏光現象^{注1)}を利用した偏光イメージセンサー^{注2)}が知られています。現在市販されている偏光イメージセンサーは、偏光方向が異なる4つの偏光子^{注3)}を備えた偏光子アレイを、複数のフォトダイオードからなるフォトダイオードアレイに積層した構造をしています。偏光子を透過した直線偏光の信号は、1ピクセル（画素）の情報としてフォトダイオードで電気信号に変換され出力されますが、ピクセルごとに直線偏光の方向を分離するため空間を犠牲にしており、検出感度や偏光消光比^{注4)}、センサーの軽量化などが課題となっています。また、光が振動面の向きによって異なる速度で物質中を進むため複数の方向に屈折する（複屈折）ことを利用して、物体を曲げたときに見られる応力の分布などの状態を円偏光成分の強度から可視化できることが分かっています。円偏光を検出するためフィルターに波長板を加えるとさらに感度が下がってしまいます（図1）。

以上のことから、高い感度と偏光消光比で偏光イメージングを実現するために、光の偏光成分をフィルターレスで検出する技術が求められていました。

一般に、円偏光の左右の回転方向を識別する能力「円偏光二色性（CD）^{注5)}」を持つ物質として、光学活性のある有機キラル分子が知られています。しかし、その多くは吸収した光のうち0.1パーセント程度しか左右円偏光の差として認識できません。有機キラル分子の円偏光吸収特性では、偏光を検出するには不十分でした。

<研究の内容>

本研究では、鉛ペロブスカイト系化合物からなる鎖状化合物に有機キラル分子を導入し、系全体にキラル配向構造を誘起した光導電性結晶薄膜を構築しました。有機キラル分子と無機材料をハイブリッド化することによって、分子のキラル構造を利用して無機結晶全体にキラリティを誘起する新しい手法であり、膜構造全体に強い円偏光吸収の特性をもたらします。さらに、この結晶薄膜を利用し、フィルターレスで円偏光の回転方向を検出するフォトダイオードの開発に成功しました。

無機材料として用いたハロゲン化鉛は、有機カチオンと反応させると1次元から3次元のペロブスカイト系化合物を形成することが知られています。今回、キラル部位を持つR⁺（+）-およびS⁻（-）-1-（1-ナフチル）エチルアミンを有機カチオンに用い、ヨウ化鉛（PbI₂）と反応させ、1次元鎖状構造のペロブスカイト系化合物からなる薄膜を作製しました。この1次元鎖状構造体は、有機キラル分子との強い相互作用により強いらせん性（右巻きまたは左巻き）が誘起されます。その結果、一般的な有機キラル分子の数千倍も強い円偏光二色性信号が観測され、薄膜構造において左右の円偏光を高感度に識別できることが分かりました（図2）。

さらに、この強い円偏光二色性信号を有する1次元鎖状構造の薄膜を用い、フォトダイオードを作製したところ、右（あるいは左）円偏光に対して、左（あるいは右）円偏光よりも、非常に高い感度を示しました（図3）。その検出感度比は2.5以上と、フィルターレ

スで円偏光を検出する素子として世界最高値を達成しました。

＜今後の展開＞

本成果により、偏光をフィルターなしで検出でき、偏光検出の著しい高感度化や装置の小型化が可能になります。これまで可視化できなかった物体表面の情報や応力の認識などを実現する新しいセンシング技術として期待されます。

＜参考図＞

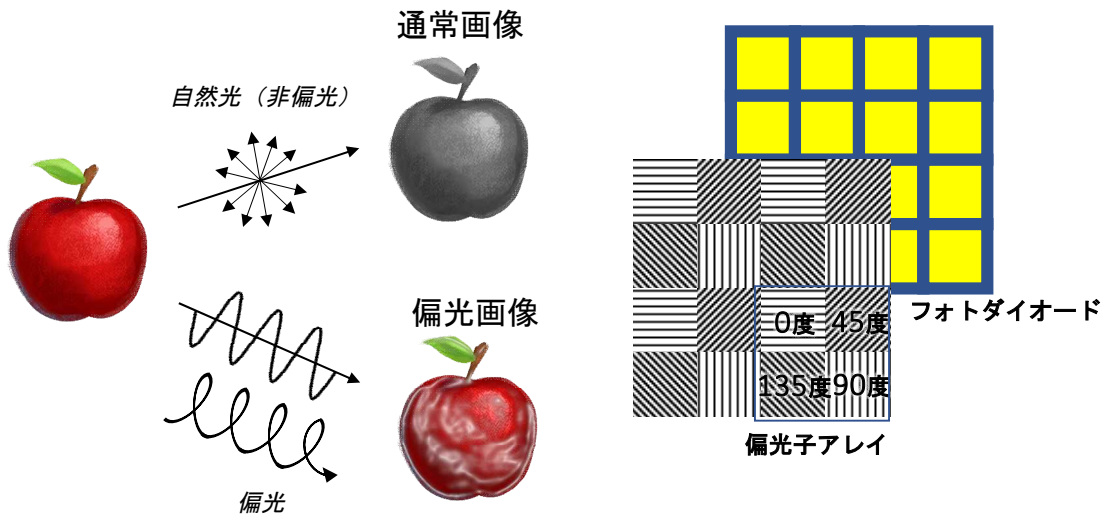


図1 偏光の検出から得られる情報と現在の偏光イメージセンサー

物体の表面で反射、散乱する光は、材質、凹凸などの表面状態や反射する角度などで偏光度や偏光方向が変化する。現在の偏光イメージセンサーはフィルターとして偏光子を使い、円偏光の検出にはさらに波長板を使うため、感度が低い。

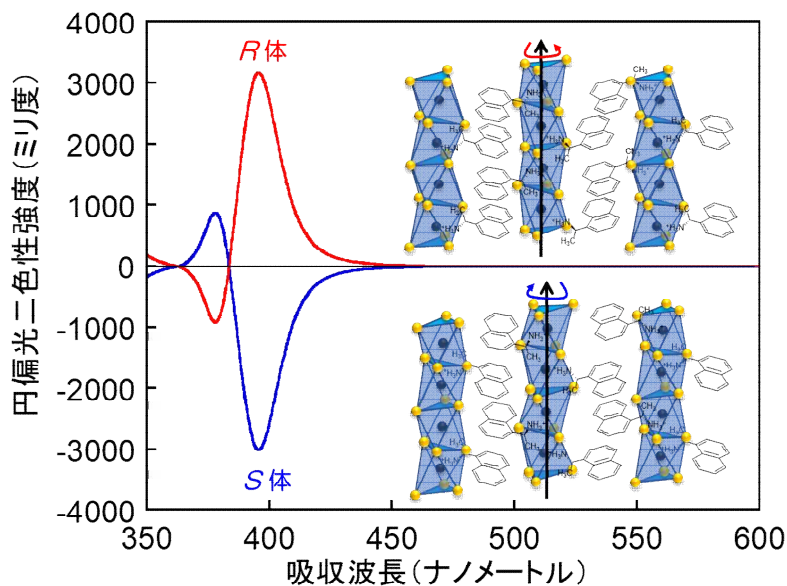


図2 キラル結晶薄膜の円偏光二色性スペクトル

有機-無機ハイブリッドのキラル結晶薄膜は、強い円偏光二色性信号が観測された。

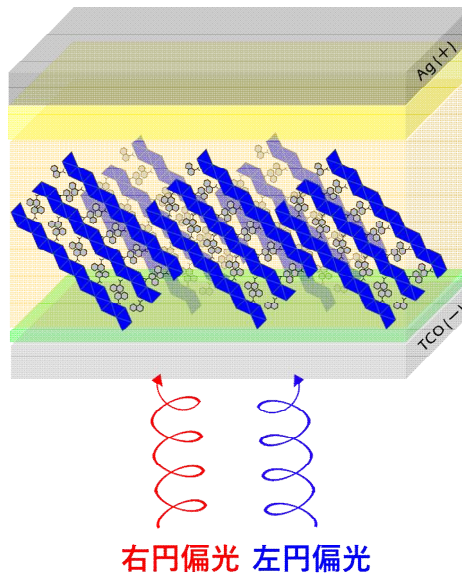


図3 円偏光検出素子の構造

有機-無機ハイブリッドのキラル結晶薄膜で、円偏光を検出するフォトダイオードを製作。フィルターなしで円偏光の高感度検出を実現した。

<用語解説>

注1) 偏光現象

物体の表面で反射、散乱した光を見て、人はその形や色を識別する。物体で反射された光は、材質、凹凸などの表面状態や反射の角度などによって、偏光度や偏光方向が変化する。偏光とは、電磁場の特定の方向に規則的に振動する光（電磁波）であり、直線偏光と円偏光（楕円偏光を含む）の2つの偏光状態がある。直線偏光は光の進行方向に対して振動方向が一定であるのに対し、円偏光は振動方向が光の伝播に伴って左右に回転する（右円偏光および左円偏光）。自然光は、さまざまな方向に偏光した光が無数に混ざり合っている非偏光である。

注2) イメージセンサー

レンズから入射した光の強度（明暗）を光検出部（フォトダイオード）で電気信号に変換し（光電変換）、変換した信号を読み出すことで画像を映し出す撮像素子。

注3) 偏光子

特定の方向の直線偏光だけを通す光学素子。現在市販されている偏光イメージセンサーやカメラでは、フォトニクス結晶やワイヤグリッド型の直線偏光子が用いられている。

注4) 偏光消光比

直交する偏光がどの程度完全に分離しているかを表す指標。

注5) 円偏光二色性（CD）

キラリティを持つ物質が円偏光を吸収する際に左円偏光と右円偏光に対して吸光度に差が生じる現象。円偏光二色性の強さは、左円偏光の吸光度と右円偏光の吸光度の差で表す。

<論文タイトル>

“Direct detection of circular polarized light in helical 1D perovskite-based photodiode”

(1次元らせんペロブスカイトによる円偏光検出)

DOI : 10.1126/sciadv.abd3274

<お問い合わせ先>

<研究に関すること>

石井 あゆみ (イシイ アユミ)

桐蔭横浜大学 大学院工学研究科 特任講師

〒225-8503 神奈川県横浜市青葉区鉄町1614

Tel : 045-974-5055 Fax : 045-974-5055

E-mail : ayumi[at]toin.ac.jp

<JSTの事業に関すること>

嶋林 ゆう子 (シマバヤシ ユウコ)

科学技術振興機構 戦略研究推進部 グリーンイノベーショングループ

〒102-0076 東京都千代田区五番町7 K's 五番町

Tel : 03-3512-3531 Fax : 03-3222-2066

E-mail : presto[at]jst.go.jp

<報道担当>

科学技術振興機構 広報課

〒102-8666 東京都千代田区四番町5番地3

Tel : 03-5214-8404 Fax : 03-5214-8432

E-mail : jstkoho[at]jst.go.jp

桐蔭横浜大学 研究推進部

〒225-8503 神奈川県横浜市青葉区鉄町1614

Tel : 045-974-5605 Fax : 045-974-5703

E-mail : research[at]toin.ac.jp