



大阪科学・大学記者クラブ 御中

(同時提供先：文部科学記者会、科学記者会)

2024年1月18日

大阪公立大学

光通信分野での新たな知見に

光の進行方向を反転することで 吸収のしやすさが2倍以上変化する物質を発見

<ポイント>

- ◇安定した光通信に必要な光アイソレータと呼ばれる素子では、複雑な構造による大型化などが課題。
- ◇光通信の波長において、光の吸収のしやすさが進行方向を反転させることで2倍以上変化する物質を発見。
- ◇外部から磁力を加えることで、透過方向の切り替えが可能。

<概要>

光通信では、レーザーの損傷やノイズを防ぐため、光を一方向にのみ透過させる光アイソレータが使用されています。一部の磁性体（磁石）が持つ光ダイオード効果^{*1}は、光の進む向きにより透過率が変化する現象で、物質単体で発現します。そのため、複雑な構造を持つ従来の光アイソレータに代わる、よりコンパクトで光強度ロスが少ない画期的な光アイソレータへの応用が期待されています。しかし実用化へは、効果の小ささや外部から磁力を加える必要があることが課題です。

大阪公立大学大学院 工学研究科の木村 健太准教授と東京大学 大学院工学系研究科の木村 剛教授の研究グループは、2価のニッケル(Ni²⁺)イオンが磁性を担うLiNiPO₄では、光通信で用いる波長の光の吸収のしやすさが、光の進行方向を反転することで2倍以上変化することを発見しました。また、外部から磁力を加えることで、光が透過しやすい方向の切り替えが可能です。

本研究成果は、米国物理学会が刊行する国際学術誌「Physical Review Letters」に、2024年1月17日にオンライン掲載されました。

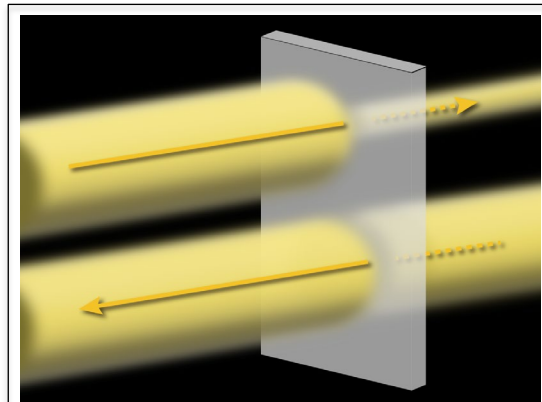
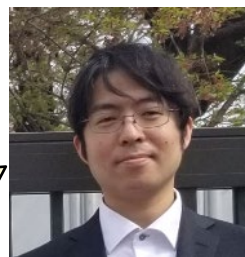


図1 光ダイオード効果の模式図

矢印は光の進む向き、円柱の大きさは光の強度を表す。LiNiPO₄（灰色の板）を透過した光の強度が、光の入射方向を反転すると変化する。

光ダイオード効果は常識とはかけ離れた現象で、思いもよらぬ応用が実現する可能性があるため、研究対象として魅力的ですが、現状では動作温度が低いなど課題が山積しています。

本研究でニッケル元素を含む化合物の有用性が示されたことで、物質選択の幅が格段に広がりました。この知見を基に、より高性能な光ダイオード効果を示す物質の開発を進めます。



木村 健太准教授

<研究の背景>

物質に光を通した時、通常物質では光の進む向きを反転しても透過率（吸収係数^{*3}）は変わりませんが、一部の磁性体（磁石）では、光の進む向きを反転させると透過率が変化します。この現象は、電流を一方向に流す電気回路部品「ダイオード」になぞらえて光ダイオード効果と呼ばれ、一方向にのみ光を透過させる光アイソレータなど、さまざまな応用が期待されています。

従来の光アイソレータは、偏光子とミラー、磁性材料など複数の部品を組み合わせた複雑な構造でできています。一方、光ダイオード効果は物質単体で発現する現象のため、この効果を高めることができれば、素子のコンパクト化や光強度ロス低減が期待できます。しかし、応用上重要な光通信波長帯域^{*4}でこれまでに観測された光ダイオード効果は、効果の小ささや、効果増幅のために強い外部磁界を加える必要があるという問題を抱えています。

<研究の内容>

光通信波長帯域における光の吸収は、電子遷移^{*5}によって生じます。光は電磁波の一種のため電場と磁場の両方を持ち、通常吸収は電場による電子遷移で起こります。一方、光ダイオード効果では電場と磁場の双方による電子遷移が重要な役割を果たし、両者の電子遷移の強さの値が近いほど光ダイオード効果が強くなります。

本研究グループは、この状況を満たす物質として、2価のニッケル（Ni²⁺）イオンが磁性を担う酸化物に着目しました。Ni²⁺系酸化物は多くの場合、6個の酸素イオンがNi²⁺の周りに八面体状に配位したNiO₆ユニットを有しており、このユニットが近赤外波長帯域で巨大な光ダイオード効果を引き起こすと予想しました。本研究のターゲットであるLiNiPO₄は、マイナス250℃程度以下で光ダイオード効果を発現するための対称性の要件を満たし、かつ、光ダイオード効果を巨大化させるNiO₆ユニットを有しています。

LiNiPO₄の単結晶を用いた測定の結果、光通信波長帯域に属する波長1,450 nmにおいて、光が左方向に進む場合と右方向に進む場合で吸収係数が2倍以上も異なることを発見しました。この変化の割合は、光通信波長帯域における光ダイオード効果としては過去最大であり、本効果は外部から磁界を加える必要がないことも分かりました。

さらに、光ダイオード効果の極性（光が透過しやすい方向）を、外部磁場でスイッチできることを発見しました（図3）。磁場によって切り替わる吸収係数の値は、スイッチを繰り返しても変化がなく、光ダイオード効果に劣化が無いことが分かります。これらの結果より、不揮発的スイッチングの可能な巨大光ダイオード効果を光通信波長帯域で実現しました。

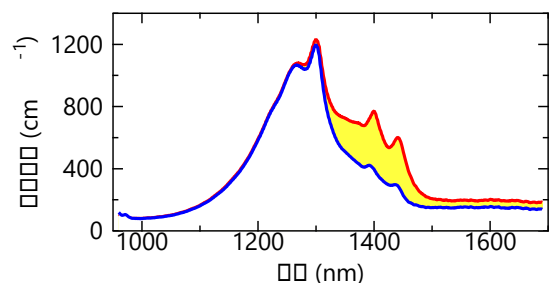


図2 光通信波長帯域におけるLiNiPO₄の吸収スペクトル。青と赤の曲線は光の入射方向の左右に相当する。その差（黄色でハイライトした部分）が光ダイオード効果を表す。

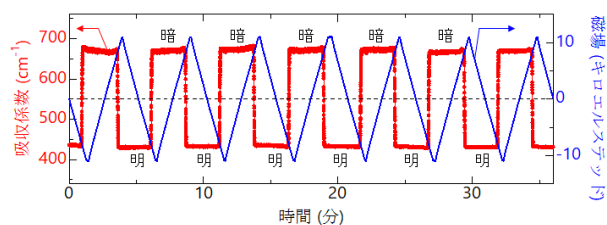


図3 磁場を±11キロエルステッドの範囲で連続的に繰り返し変化させた際の吸収係数の変化。磁場の大きさが閾値を超えると吸収係数の大と小（暗と明）が切り替わる。これは光ダイオード効果の極性がスイッチしたことを意味する。

<期待される効果・今後の展開>

NiO₆ ユニットの活用が光ダイオード効果の巨大化に有効であるという物質設計指針が明らかになりました。ただし、本研究で発見した LiNiPO₄ の光ダイオード効果は極低温での発現に限られます。

今後、本指針を基にした物質開発により光ダイオード効果の動作温度の向上や巨大化が可能になると、コンパクトで低損失、さらにはスイッチング可能という高付加価値をもつ光アイソレータなど、かつてない画期的な光学製品の開発につながると期待されます。

<資金情報>

本研究は、科学研究費補助金 新学術領域研究「量子液晶の物性科学」(JP19H05823)、科学研究費補助金 (JP19H01847、JP21H04436、JP21H04988)、文部科学省科学技術人材育成費補助金 (卓越研究員事業)、村田学術振興財団、池谷科学技術振興財団の助成のもと行われました。

<用語解説>

※1 光ダイオード効果…光の入射方向を反転すると物質の透過率（あるいは吸収係数）が変化する現象。非相反光吸収や方向二色性とも呼ばれる。この現象を発現するためには、物質の空間反転対称性と時間反転対称性が共に破れている必要がある。

※2 LiNiPO₄…LiNiPO₄ の磁性を担う Ni²⁺イオンの磁気モーメント（ミクロな磁石）は、室温ではランダムな方向を向いている。しかし、マイナス 252°C以下になると、Ni²⁺イオンの磁気モーメントは特定の規則で配列する。この磁気モーメントの配列によって空間反転対称性と時間反転対称性が共に破られるため、LiNiPO₄ は光ダイオード効果の発現要件を満たす。

※3 吸収係数…物質に光を入射させたとき、その物質が単位長さ当たりどれだけ光を吸収するかを表す物理量。

※4 光通信波長域…光通信に使われる光（電磁波）の波長域。1000~1675nm の範囲を指す。

※5 電子遷移…何らかの刺激（ここでは光）により、電子がエネルギーの低い状態から高い状態に移ること。エネルギーが高い状態から低い状態に移ることも電子遷移と呼ぶ。

<掲載誌情報>

【発表雑誌】 Physical Review Letters

【論文名】 Nonvolatile switching of large nonreciprocal optical absorption at shortwave infrared wavelengths

【著者】 Kenta Kimura and Tsuyoshi Kimura

【掲載 URL】 <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.132.036901>

【研究内容に関する問い合わせ先】

大阪公立大学大学院 工学研究科
准教授 木村 健太 (きむら けんた)

TEL : 072-252-6187

E-mail : kentakimura@omu.ac.jp

【報道に関する問い合わせ先】

大阪公立大学 広報課

担当：竹内

TEL : 06-6605-3411

E-mail : koho-list@ml.omu.ac.jp