



光／物質ハイブリッド状態における量子重ね合わせを新たに実現 ～室温下での実現により、新たな量子技術の発展に期待～

1. 発表者：

京都工芸繊維大学 電気電子工学系 教授 山下 兼一

京都工芸繊維大学 電気電子工学系 准教授 高橋 駿

2. 発表のポイント：

- ◆光と物質のハイブリッド状態として知られるポラリトン状態^{注1}が、特殊な半導体材料の使用により、室温で量子的な重ね合わせ状態を形成できることを示した。
- ◆この重ね合わせ状態は、半分は光としての性質を持つポラリトン状態の偏光特性^{注2}を利用したものであり、全無機鉛ハライドペロブスカイト^{注3}と呼ばれる特殊な物質でのみ実現可能な新しい量子状態である。
- ◆本発見は、量子計算をはじめとした様々な量子技術を室温で駆動するための基礎物理となり得るものであり、デバイスの低消費電力化技術の発展への寄与も期待できる。

3. 発表概要：

京都工芸繊維大学 電気電子工学系 山下兼一教授、高橋駿准教授らは、光と物質のハイブリッドな性質を持つ量子状態として知られるポラリトン状態が、全無機鉛ハライドペロブスカイトと呼ばれる特殊な半導体材料の使用により、量子的な重ね合わせ状態を形成可能であることを示した。ポラリトン状態は、ある密度以上で生成されると、多数のポラリトンが協同してエネルギー凝縮（ポラリトン凝縮）を引き起こし、巨視的に全体で一つの量子としての振る舞いを示す。全無機鉛ハライドペロブスカイトでは、このポラリトン凝縮状態が室温で形成可能となる。今回の研究では、この室温ポラリトン凝縮の直交する二つの偏光状態間で量子的な重ね合わせ状態が形成できることを実験的に見出した。本発見は、量子計算をはじめとした様々な量子技術を室温で駆動するための基礎物理となり得るものであり、デバイスの低消費電力化技術の発展への寄与も期待できる。

4. 発表内容：

研究の背景

光の波長サイズの狭い領域に光波を閉じ込める微細構造である光微小共振器を、半導体材料を用いて作製することにより、半導体中の電子状態（電子／正孔対）と閉じ込められた光波（光子）の相互作用が強められ、光と物質のハイブリッドな性質を持つポラリトン状態と呼ばれる準粒子状態が生成される。このポラリトン状態はレーザーや太陽電池などの様々な光電子デバイスの基礎物理として知られたものであり、さらにそのエネルギー凝縮相（ポラリトン凝縮相）は次世代量子デバイスのための量子媒体としても期待されている。特に、すべて無機元素で構成される鉛ハライドペロブスカイト半導体の一種（ CsPbBr_3 ）においては、高密度でも安定なスピン相関型の電子－正孔対がポラリトン状態の形成に関与しており、室温でもポラリトン凝縮状態の形成が可能であることが示さ

れている。このような室温ポラリトン凝縮状態を量子技術として応用展開していくためには、量子重ね合わせ状態や量子もつれ状態などを順次実証していくことが求められている。

研究内容

本研究では、この CsPbBr₃ 微小共振器における室温ポラリトン凝縮相の量子重ね合わせ状態を、直交する二つの偏光状態間での重ね合わせにより実現可能であることを示した。CsPbBr₃ はほぼ立方晶に近い結晶構造を取るが、室温ではごくわずかに歪みが生じており、直交する二つの偏光方向での屈折率がごくわずかに異なる。これにより、形成されるポラリトン状態のエネルギーもわずかに異なってくる。山下教授らは、このような特異な材料特性と、エネルギー凝縮することでわずかにエネルギーシフトを起こすというポラリトンの性質を活用することで、異なる性質を持った二つのポラリトン偏光状態をほぼ同じエネルギーとして共鳴させることが可能であることを見出し、量子的な重ね合わせ状態の形成に成功した。これは、ポラリトン状態のエネルギー特性を詳細に分析することが可能な特殊な光学評価システムを構築、適用することにより得られた成果である。単純な光の状態では直交する二つの偏光状態は決して混成させることができないが、光と物質のハイブリッド状態であるポラリトン状態の利用がこの課題解決の一つの手段となる可能性も示唆している。

今後の展開

本研究成果の発表により、室温ポラリトン状態を用いた量子技術の進展がより活発になることが期待される。今後は、この室温ポラリトンの生成と伝搬、および量子状態の制御技術をさらに高め、量子ゲート操作の実現や大規模集積化など、なるべく室温に近い環境下での量子デバイス応用を見据えたさらなる研究展開が求められる。また、この室温ポラリトン状態にトポロジカルな物性を付与することで、新たな量子技術へと展開することも期待される。

謝辞

本研究は、科学技術振興機構 (JST) 戦略的創造研究推進事業 CREST「トポロジカル材料科学に基づく革新的機能を有する材料・デバイスの創出」研究領域 (No. JPMJCR20T4)、日本学術振興会 (JSPS) 科学研究費国際共同研究強化 (B) (No. 20KK0088)、同基盤研究 (A) (No. 22H00215)、同挑戦的研究 (萌芽) (No. 22K18794) の支援を受けて行われた。

5. 発表雑誌：

雑誌名：Communications Materials

論文タイトル：Polarization superposition of room-temperature polariton condensation

著者：Yuta Moriyama, Takaya Inukai, Tsukasa Hirao, Yusuke Ueda, Shun Takahashi, and Kenichi Yamashita

DOI 番号：10.1038/s43246-023-00440-w

アブストラクト URL：https://www.nature.com/articles/s43246-023-00440-w

6. 用語解説：

注 1) ポラリトン状態

光の波長サイズの狭い領域に光波を閉じ込める微細構造である光微小共振器を、半導体材料を用いて作製することにより、半導体中の電子状態 (電子 / 正孔対) と閉じ込められた光波 (光子) の相互作用が強められ、光と物質のハイブリッドな性質を持つ準粒子が生成される。生成された準粒子状態は「ポラリトン状態」と呼ばれ、レーザー光源の低閾値化や太陽電池の高効率化の基礎物理となることが期待されている。

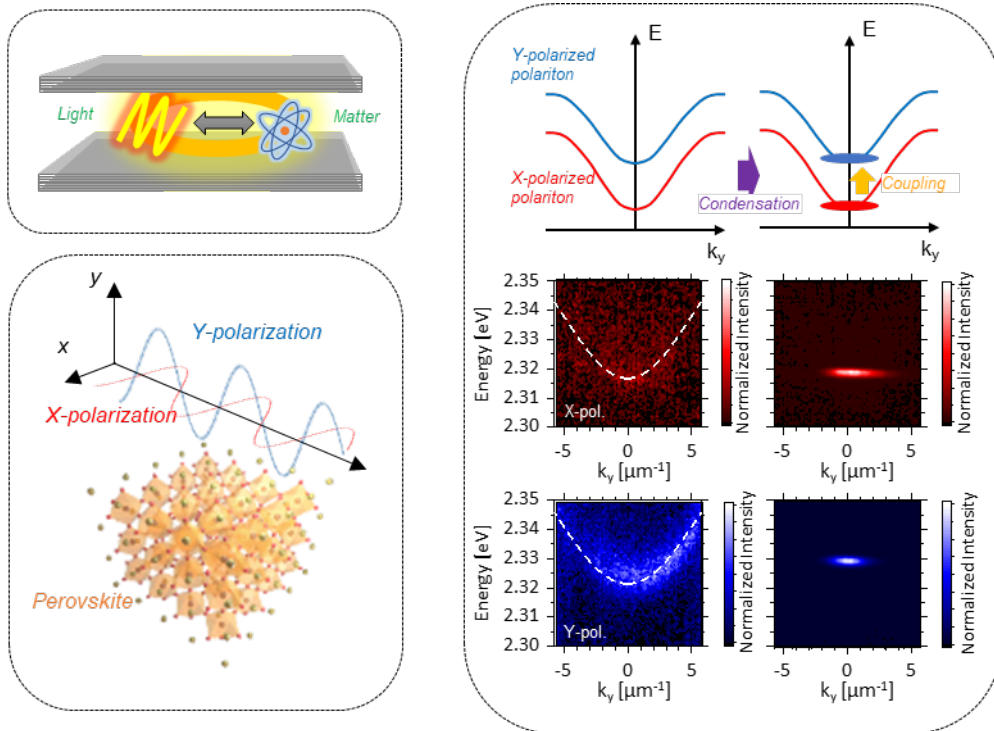
注 2) 偏光

電磁波である光波において、その電場と磁場がある特定の振動状態にある場合、それを偏光した光波と呼ぶ。また、ある光波の電場および磁場の振動状態はその光波の偏光特性として、しばしば表現される。

注 3) 全無機ペロブスカイト

ペロブスカイト型と呼ばれる立方晶系の結晶構造を持つ化合物のうち、鉛ハライドからなる化合物半導体が次世代の光電子材料として知られている。この中でも、すべて無機元素からなる全無機ペロブスカイトは優れた発光特性を示すものとして注目されている。

7. 添付資料 :



光の波長程度（1 マイクロメートル以下）の微小な光共振器中においては光と物質の相互作用が強められ、ポラリトン状態を形成する（左上図）。今回の研究では、この微小共振器中に全無機ペロブスカイト結晶を配置し、直交する二つの偏光状態の光波と相互作用させてポラリトン状態を形成した（左下図）。エネルギー凝縮した X および Y 方向に偏光したポラリトン状態はそのエネルギーが近いため、重ね合わせ状態を形成する（右図上段）。右図下段はその観測結果の一例である。