

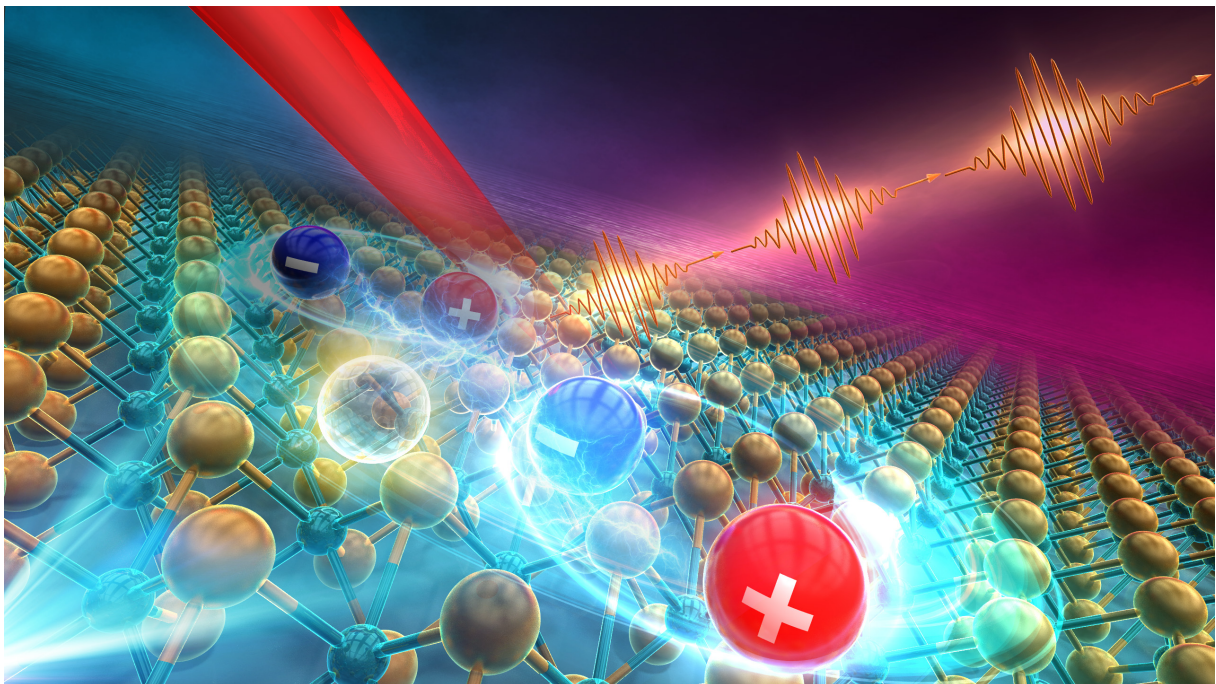
次世代半導体中の欠陥からの磁場による発光の増強と単一光子発生 －量子情報通信のためのデバイスの高性能化への新たなアプローチ－

概要

インターネットに代表される古典的な光通信は、セキュリティの面において限界がある事が指摘されています。これに対して、量子力学の原理に基づく光の粒子性（単一の光子）を利用した量子情報通信では、こうした根本的な限界を克服する可能性があり、より安全な次世代の通信技術として注目を集めています。

Yubei Xiang エネルギー科学研究科博士課程学生、物質・材料研究機構（NIMS）の渡邊 賢司 特命研究員、谷口尚 同理事、篠北啓介 エネルギー理工学研究所 助教（研究当時、現：分子科学研究所准教授）、松田一成 同教授らの研究グループは、次世代半導体である二セレン化タングステン（ WSe_2 ）にわずかな欠陥を導入し、そこから発せられる光（発光）を通して、量子情報通信に必要とされる単一光子源としての機能を調べました。その結果、興味深いことにわずかな磁場をかけると、発光信号がより強くなり（明るくなり）、単一光子発生の様子が変化することを見出しました。この発見は外部からの磁場を用いて単一光子源を制御するという新しい手段を提供し、量子通信や量子コンピューティングの将来技術にとって重要な進展と言えます。

本研究成果は、2025 年 6 月 4 日、米国の国際学術誌「*Science Advances*」にオンライン掲載されました。



磁場による二次元半導体中の欠陥からの発光増大と単一光子発生の模式図

1. 背景

インターネットに代表される古典的な光通信は、セキュリティの面において限界があることが指摘されています。これに対して、量子力学の原理に基づく光の粒子性（単一の光子）を利用した量子情報通信では、こうした根本的な限界を克服する可能性があり、より安全な次世代の通信技術として期待されています。近年、単層の遷移金属ダイカルコゲナイド（ MX_2 : $\text{M}=\text{Mo}, \text{W}$, $\text{X}=\text{S}, \text{Se}$ ）に代表されるわずかな原子数層の極めて薄い二次元半導体が、その優れた電気・光学的な特性から次世代半導体として大きな注目を集めています。その中でも単層の二セレン化タングステン（ WSe_2 ）においては、わずかな欠陥（材料の不完全性）を導入すると、光で生成された励起子（電子と正孔対）がその欠陥に束縛され、再結合で光を発する（発光）際に単一の光子のみを放出します。そのため、量子情報通信に不可欠な一個の光子のみを発する単一光子発生源として、大きな可能性を秘めている一方で、その単一の光子発生の効率をどのように上げるかが、将来の量子技術にとって極めて重要な課題となっています。

2. 研究手法・成果

そこで我々は、単層の二セレン化タングステン（ WSe_2 ）を加熱することで、わずかな欠陥を導入した試料を作製しました。これに対して、光で生成された電子とホール対（励起子）では、欠陥が導入されることで結晶の対称性が破れ、光学的に活性な「明るい励起子」と光学的に不活性な「暗い励起子」の二種類の状態が生じます。実際に約マイナス 265 度の極低温では、これら二種類の励起子から生じる二つの鋭い発光のピークが観測されました。

ここで注目すべきは、一般的な半導体の光学実験で使用する磁場の 1/10 程度の磁石で 1 テスラ (10000 ガウス) 以下の比較的弱い磁場を印加すると、明るく発光するようになることを見出したことです。これはわずかな磁場でも、二つの励起子の状態が良く混ざり合う事に起因しています。さらに、放出された光の統計性を確認するため、光子相関測定を行ったところ、光子一つ一つが放出される光子アンチバンチングが明確に示されました。これは、磁場下でも一つ一つの光子を発生させる単一光子源と働くこと、また、磁場によって単一光子発生の効率を上げることができることを示しています。これにより、単一光子発生を制御する方法として磁場をかけるという、新たな指針を示すことができました。

3. 波及効果、今後の予定

本研究では、原子レベルの薄さの次世代半導体中の欠陥において、磁場を用いて発光の増大（明るくする）や単一光子発生の効率を上げる新しいアプローチを提示することに成功しました。この研究をきっかけとして、コンパクトかつ効率的な量子情報デバイスの実現に向けて、今後、動作温度の更なる向上は必要になりますが、将来の量子通信システムの有望なアプローチやプラットフォームとして利用しうることが期待されます。

4. 研究プロジェクトについて

科学研究費助成事業 基盤研究(S)「原子層人工ヘテロ構造におけるバレースピン量子光学の開拓と応用」20H05664、学術変革領域研究(A)「2.5次元構造の分析技術開発」21H05235、「2.5次元物質科学の総括」21H05232、基盤研究(S)「ロボット技術支援によるモアレ量子プラットフォームの創生と応用」25H00417、挑戦的研究(萌芽)「バレースピン制御とデバイス応用：バレートロンクスに向けた課題と挑戦」22K18986、基盤研究(S)「低次元状態の埋め込みに基づく新物質科学」23H05469、基盤研究(B)「モアレ超構造における協力的量子光学現象の開拓」21H01012、科学技術振興機構（JST）創発的研究支援事業「半導体モアレ超構造を用いた量子電磁力学の創生」MJFR213K、科学技術振興機構（JST）戦略的研究推進事業「二次元半導体・ヘテロ構造の量子光プラットフォームの構築と応用」MJCR24A5、基盤研究(A)「窒化ホウ素の科学のための

高品位単結晶創製」20H00354、学術変革領域研究(A)「2.5次元構造体のための物質創製」21H05233、文部科学省元素戦略プロジェクト/研究拠点形成型 MXP0112101001 の支援を受けて行われました。

<用語解説>

1. 光子：光は、波と粒子の二重の性質を持つため、光の粒としての性質を表す。
2. 単一光子源：量子情報通信で情報を伝達する際に必要不可欠なデバイスである。特に、光子1つ1つに情報を乗せることで、盗聴を検知し安全な通信を実現するため、光源から放出される光が、一度に1個の光子を放出することが必要となる。
3. 励起子：光で半導体中につくられた電子とその抜け穴であるホールは、クーロン力によって引き合い水素原子様な状態を形成し、これを励起子と呼ぶ。

<研究者のコメント>

「本研究成果は、将来の量子情報通信に繋がる新たな可能性を開くものであると考えています。試料の作製や精密光学測定など数多くの困難がありましたが、プロジェクトを通して指導教官や共著者の方々に支えられたことは幸運でした。彼らの励ましとチームワークのおかげで、この研究を形にすることができ、私を助けてくださったすべての方々、特に貴重なアドバイスをくださった先輩方、研究の議論に付き合ってくれた後輩たちに心から感謝しています。」(Yubei Xiang)

<論文タイトルと著者>

タイトル：Magnetic brightening and its dynamics of defect-localized exciton emission in monolayer two-dimensional semiconductor

(単層二次元半導体での欠陥に束縛された励起子発光の磁場による増大とそのダイナミクス)

著者：Yubei Xiang, Keisuke Shinokita, Kenji Watanabe, Takashi Taniguchi, Kazunari Matsuda

掲載誌：Science Advances DOI：10.1126/sciadv.adr5562