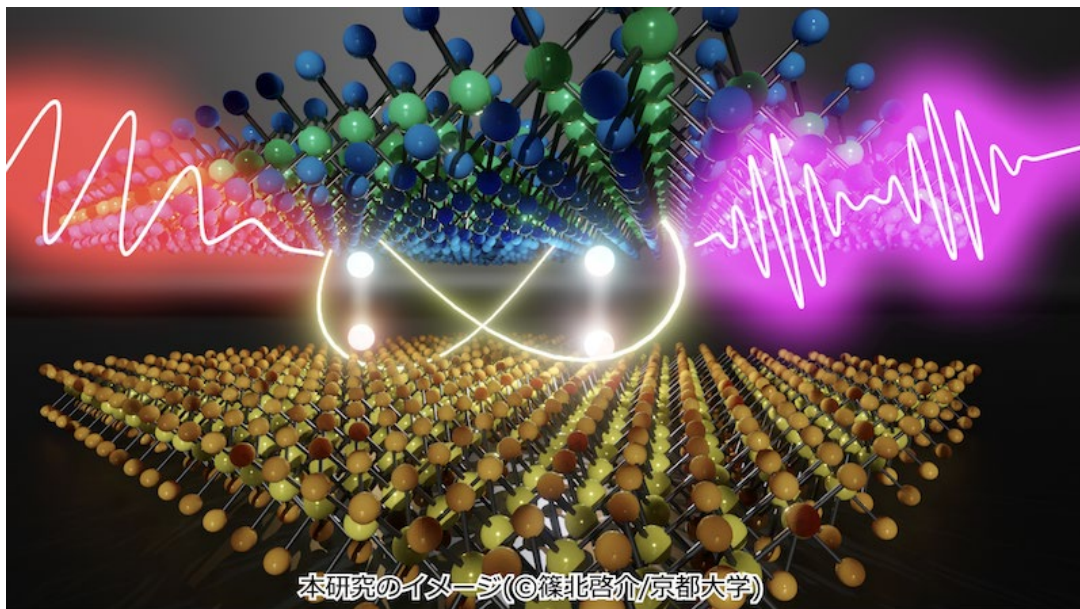


二次元半導体を重ねたモアレ縞からの量子コヒーレンス測定に成功

：次世代ナノ半導体による量子技術への第一歩

概要

量子コンピューターに代表される量子技術では、量子ビットと呼ばれる演算単位を用意する必要があります。そのような量子ビットでは、量子的な波の状態がどれだけの時間維持されているかを示す、量子コヒーレンス時間が重要な量となっています。近年、わずか原子数層の極めて薄い二次元半導体と呼ばれる次世代ナノ半導体において、その二次元半導体を重ねてできるモアレ干渉縞に閉じ込められた、電子とホール対（モアレ励起子）を量子ビットとして機能させることが期待されています。しかし、このモアレ励起子の量子コヒーレンス時間に関する情報は、技術的な困難さから未解明のままでした。Haonan Wang エネルギー科学研究科博士課程学生、物質・材料研究機構の渡邊賢司 特命研究員、谷口尚 理事、篠北啓介 エネルギー理工学研究所 助教、松田一成 同教授らの研究グループは、技術的な困難である光で生成されるモアレ励起子の数を減らす新たな技術を開発し、その量子コヒーレンス時間を測ることに成功しました。これは、次世代ナノ半導体による量子技術への応用に向けた第一歩であると考えられます。本研究成果は、2024年6月8日、「Nature Communications」にオンラインで掲載されました。



本研究のイメージ(©篠北啓介/京都大学)

図のキャプション：二次元半導体のモアレ励起子からの発光と量子コヒーレンス測定のイメージ

1. 背景

量子コンピューターに代表される量子技術では、量子ビットと呼ばれる演算単位を用意する必要があります。そのような量子ビットでは、量子的な波の状態がどれだけの時間維持されているかを示す、量子コヒーレンス時間が重要な量となっています。近年、わずか原子数層の極めて薄い二次元半導体と呼ばれる次世代ナノ半導体において、この二次元半導体を重ねてできるモアレ干渉縞によって閉じ込められた、電子とホール対（モアレ励起子）を量子ビットとして機能させることが期待されています。しかし、光による計測では回折限界と呼ばれる制限から十分に光を絞り込むことができず、非常に数多くのモアレ励起子からの信号を観測することしかできませんでした。そのためこのような技術的な困難さから、モアレ励起子の量子コヒーレンス時間がどのくらい維持されているかなどに関する情報は、未解明のままでした。

2. 研究手法・成果

この技術的な困難を克服するため、研究グループは電子線微細加工技術と反応性イオンエッチングを組み合わせることによって、観測するモアレ励起子の数を制限する新しい手法を開発しました。それにより、たった一個のモアレ励起子からの発光信号を検出することが可能となり、その発光信号の検出にマイケルソン干渉計を組み合わせることで、一個のモアレ励起子の量子コヒーレンス時間を直接測定することを可能としました。

その結果、一個のモアレ励起子の量子コヒーレンスは、-269度の低温で12ピコ秒（ピコ秒： 10^{-12} 秒）以上維持されていることが明らかとなりました。これは、母物質である二次元半導体での励起子の量子コヒーレンス時間よりも10倍以上長く、励起子がモアレポテンシャルに閉じ込められることによって、コヒーレンスが失われにくいことがわかりました。さらに量子ビートと呼ばれる現象から、二つの異なるモアレに閉じ込められたモアレ励起子間の量子干渉などその間での結合が示唆されています。

3. 波及効果、今後の予定

二次元半導体を重ねてできるモアレ干渉縞に閉じ込められた、モアレ励起子は量子ビットとして機能させることが期待されています。モアレ励起子の量子コヒーレンス時間が判明し、次のステップとしてその量子操作の実験を行う足掛かりができました。そのため、本成果は次世代ナノ半導体において、量子コンピューティングなどの量子技術に向けた第一歩であると考えられます。

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、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(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、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」、学術変革領域研究(A)「2.5次元構造体のための物質創製」、文部科学省元素戦略プロジェクト/研究拠点形成型 MXP0112101001、文部科学省マテリアル先端リサーチインフラ MXP1222JI0020、の支援を受けて行われました。

<用語解説>

1. 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。
2. モアレ干渉縞：二つの周期的なパターンを角度をつけて（ひねって）重ねると生じる、縞模様を指す。二つの二次元半導体を積み重ね特定の角度でひねると、周期的な結晶のモアレパターンが形成され、それはモアレポテンシャルと呼ばれる周期的なポテンシャルとして働く。
3. コヒーレンス：波の持つ性質の一つで、位相の揃い具合を表す。すなわち、波の干渉のしやすさを表している。コヒーレンス時間は、電子や励起子（電子とホール対）の量子力学的な波の状態の可干渉が、維持されてる時間に対応する。

<研究者のコメント>

（Haonan Wang エネルギー科学研究科博士課程学生）この研究の意義は、量子力学的なコヒーレンスという重要な物理量を、次世代ナノ半導体のモアレ超格子という興味深く有望なプラットフォームで、明らかにできたことです。この研究をきっかけとして、新しい半導体での量子デバイスの開発に向けて大きな可能性を示すことができました。

<論文タイトルと著者>

タイトル：Quantum coherence and interference of a single moiré exciton in nano-fabricated twisted monolayer semiconductor heterobilayers

ナノ微細加工したツイスト単層半導体ヘテロ二層における単一モアレ励起子の量子コヒーレンスと干渉

著者：Haonan Wang, Heejun Kim, Duanfei Dong, Keisuke Shinokita, Kenji Watanabe, Takashi Taniguchi, and Kazunari Matsuda

掲載誌：Nature Communications DOI：10.1038/s41467-024-48623-4