2026 年 11 月 18 日

原子一層の発光素子で「電圧の壁」を突破
～二次元半導体に超高密度電流注入、次世代レーザー実現へ～

【本研究のポイント】

・電解質中のイオンの並び方を低温で固定する新しい手法を開発。
・従来約 4 V 程度が限界だった動作電圧を 20 V まで高めることに成功。
・原子一層の WSe_2 発光素子で最大 0.8 MA cm^{-2}（80 万アンペア/平方センチメートル）の超高密度電流注入を達成。
・本研究で調査した原子一層の発光素子の中で世界最高値であり、次世代レーザーへの道を開く成果。

【研究概要】

名古屋大学大学院工学研究科の大井 浩司 博士後期課程学生、中埜 彰俊 講師、竹延 大志 教授らの研究グループは、東京科学大学理学院物理学系の欧 昊 助教、蒲江 准教授、物質・材料研究機構（NIMS）ナノアーキテクトニクス材料研究センターの宮田 耕充 グループリーダーとの共同研究により、電解質中のイオン配置を低温で凍結することで、原子一層の二次元半導体発光素子に従来の電気化学的な電圧限界を大きく超える電圧を印加し、超高密度の電流を注入することに成功しました。

その結果、従来約 4 V 程度だった動作電圧を 20 V まで大幅に高め、最大 0.8 MA cm^{-2} の超高電流密度を実現し、その状態でも明瞭な発光を確認しました。

本成果は、将来、原子一層の半導体を電気で光らせ、レーザーとして動作させるための重要な一歩であり、これまでの半導体では到達が難しかった全く新しい発光素子の開拓につながると期待されます。

本研究成果は、2026 年 11 月 18 日（日本時間）付で、Wiley 社が発行する学術誌『Small』誌に掲載されました。

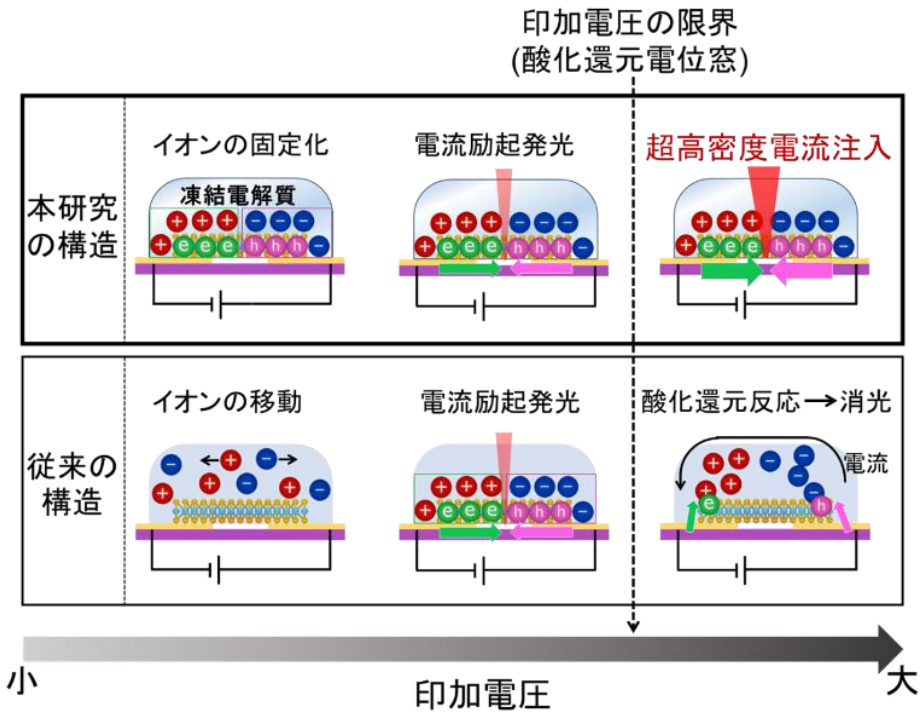


図 1:研究戦略の概要

【研究背景と内容】

二次元半導体の一種であるVI族元素の遷移金属ダイカルコゲナイド(TMDC)[注 1)]の単層膜は、原子一層という極めて薄い構造を持ちながら、直接遷移型半導体として強い発光を示します。また、電子と正孔が結び付いて形成される励起子[注 2)]が安定で、強い光と物質の相互作用や光学利得も報告されていることから、励起子デバイス、ポラリトンデバイス、レーザーなどへの応用が期待されています。これらの機能を電気によって実現するためには、二次元半導体へ高密度に電子と正孔を注入することが重要です。

これまで、二次元半導体を用いた発光素子では、異なる半導体材料を組み合わせてPN接合[注 3)]を作る素子や、トンネル接合を利用する素子、ゲート電極によって電子や正孔を蓄積する素子など、さまざまな構造が研究されてきました。しかし、これらの方法では超高密度な電流注入には限界がありました。これに対し、電解質を用いた電気二重層型発光素子[注 4)]では、電解質中のイオンを利用することで、より高い密度の電子や正孔を二次元半導体に蓄積できるため、高密度電流注入に有利です。一方で、電圧を高くすると電解質の酸化還元反応[注 5)]が起こるため、安定に印加できる電圧には限界があります。今回用いた電解質では、その目安は約 4 V 程度です。そのため、高密度なキャリアを形成できても、さらに電圧を高めて電流密度を増加させることが困難でした。そこで本研究グループは、図 1 に示すように発光に必要な PN 接合を形成した後、その状態を維持したまま電解質を低温で凍結する手法を開発しました。

具体的にはイオンが移動できる 280 K 付近で電圧を加えて TMDC の一種である WSe_2 中に p 型領域と n 領域を形成し、その状態を維持したまま 10 K まで冷却しました。10 K という極低温ではイオンは固定されます。そこで、低温でイオンの移動を抑えることにより、従来の酸化還元窓[注 5)]を超える高電圧印加が可能になると考えました。その

結果、従来の酸化還元窓を大きく超える 20 V までの動作を実現し、最大電流密度は 0.8 MA cm^{-2}(80 万アンペア/平方センチメートル)に達しました(図 2 a)。この値は、本研究で調査した既報の TMDC 発光素子の中で最も高く、従来の電解質型発光素子の最高値の約 1.5 倍に相当します(図 2 b)。さらに、この超高密度電流注入下でも明瞭な電流励起発光を観察することができました(図 2 a)。

今回の成果は、電気二重層型素子が持つ高密度なキャリアを形成できるという利点を維持したまま、高電圧を印加できないという従来の制約を克服する手法を示したものです。今後、この技術を光共振器などと組み合わせることで、高密度励起子状態やポラリトン状態の実現、さらには二次元半導体を用いた電流励起レーザーの発展が期待されます。

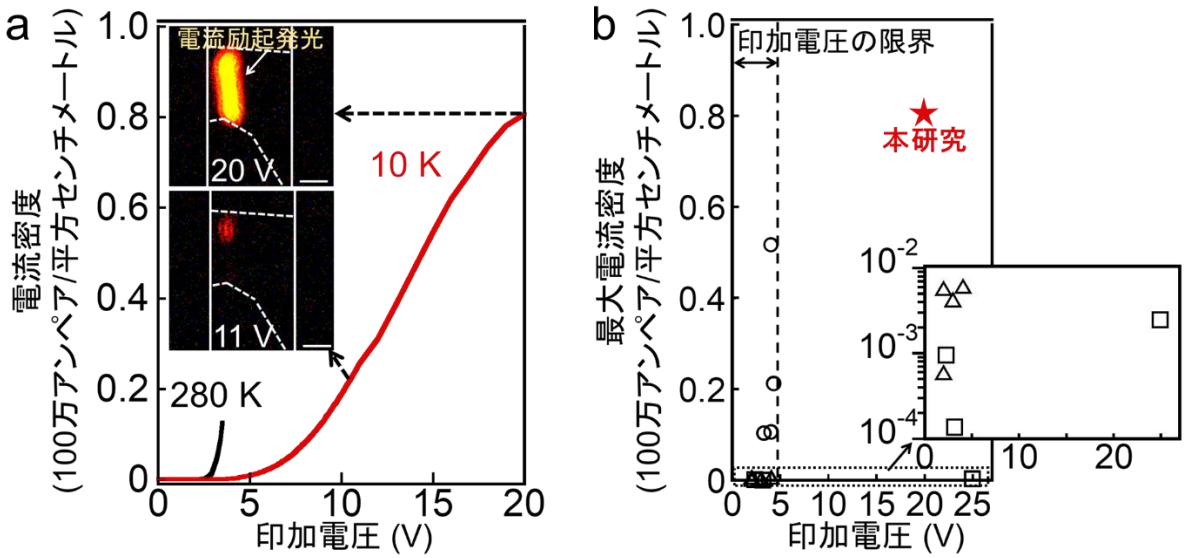


図 2:実験成果の概要

左側の図 a は 280 K および 10 K における電流密度―電圧特性。電解質を凍結した 10 K では 20 V で動作し、最大 0.8 MA cm^{-2} の電流密度に到達した。挿入図は 11 V および 20 V における発光像。右側の図 b は 既報の TMDC 発光素子との比較。本研究は、調査した既報の中で最も高い電流密度を示した。

【成果の意義】

本研究の意義は、電解質を用いたデバイスがこれまで抱えてきた「高密度に電子や正孔を蓄積できる一方、高い電圧を印加できない」というトレードオフを、イオン配置を形成した後に低温で凍結するというシンプルな方法によって克服した点にあります。これにより、電気二重層の高いキャリア蓄積能力を維持したまま、従来の電気化学的な電圧限界を超えて電流を注入する新しい道が開かれました。

今回実現した超高密度電流注入は、これまで電気的には到達が難しかった高密度の励起子状態やポラリトン状態を探索するための基盤となります。将来的には、光共振器などと組み合わせることで、「原子一層の半導体を電気で駆動するレーザー」をはじめとする新しい光デバイスへの展開が期待されます。

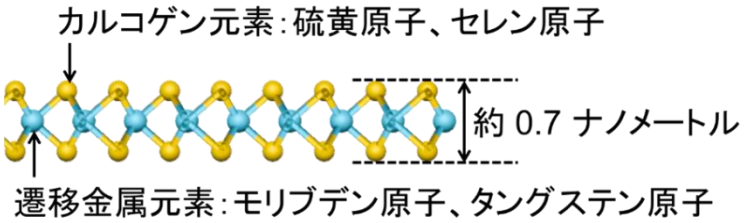
本研究は、日本学術振興会(JSPS)科学研究費助成事業(課題番号:JP21H05232、

JP21H05234、JP21H05236、JP22H00280、JP22H04957、JP22KJ1555、JP22K19059、JP22H01899、JP24H00044、JP25H00835、JP25K17908、JP25K22285）、科学技術振興機構（JST）創発的研究支援事業（課題番号:JPMJFR213X、JPMJFR223Z）、および戦略的創造研究推進事業 CREST（課題番号:JPMJCR23A4、JPMJCR23O3）の支援を受けて実施されました。また、Hao Ou は日本学術振興会特別研究員制度の支援を受けました。

【用語説明】

注 1）遷移金属ダイカルコゲナイド（TMDC）:

遷移金属元素（モリブデン、タングステンなど）とカルコゲン元素（硫黄、セレンなど）から構成される層状材料の総称。代表的な材料として MoS_2、$MoSe_2$、WS_2、WSe_2 などがある。これらの材料を一層まで薄くすると極めて薄い二次元半導体となり、強い発光や安定な励起子など、従来の半導体とは異なる特徴的な光学特性を示す。本研究では WSe_2 の単層膜を用いた。

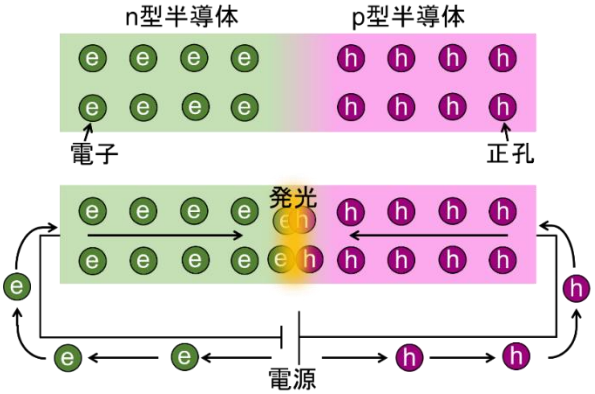


注 2）励起子:

半導体中で、負の電荷を持つ電子と、電子が抜けたことで生じる正の電荷を持つ正孔が、電気的な引力によって結び付いた状態。電子と正孔が再結合する際には光を放出することがあり、半導体の発光現象において重要な役割を担う。TMDC 単層膜では励起子が安定に存在するため、励起子を利用した光デバイスやレーザーなどへの応用が研究されている。

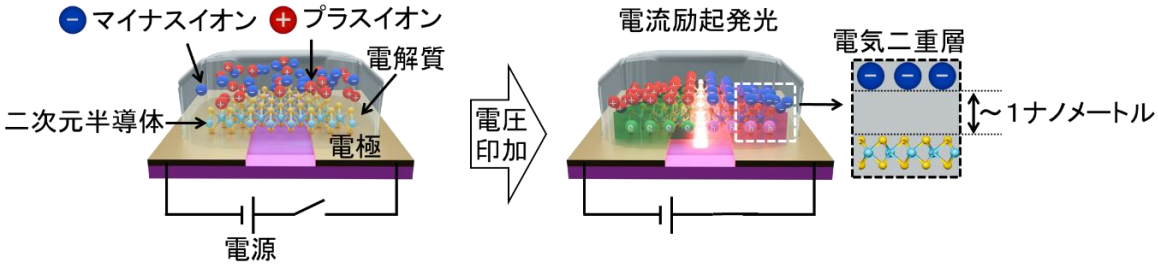
注 3）PN 接合:

電子を主な電荷の担い手とする n 型半導体と、正孔を主な電荷の担い手とする p 型半導体が接した構造。発光ダイオードでは、PN 接合に電子と正孔を注入し、それらを再結合させることで光を発生させる。本研究では、不純物を添加して PN 接合を形成するのではなく、電解質中のイオンを利用して単層 WSe_2 の一方に電子、もう一方に正孔を蓄積することで PN 接合を形成した。



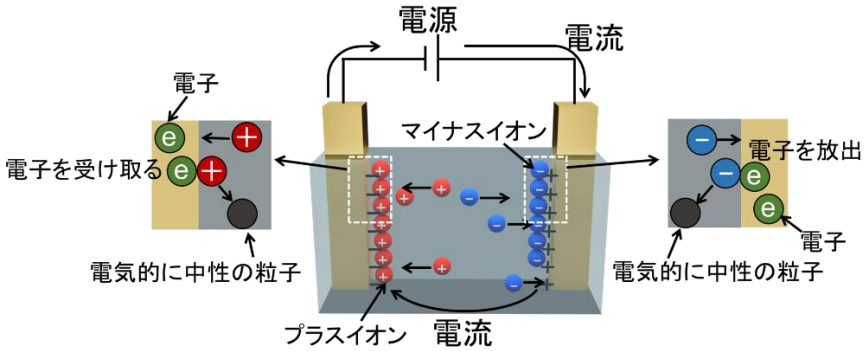
注 4)電気二重層型発光素子:

電解質中の正負のイオンを利用して、半導体に電子と正孔を高密度に蓄積し、発光させる素子。電圧を加えると、電解質中のイオンが半導体表面の近くに集まり、それと反対の電荷を持つ電子や正孔が半導体側に蓄積する。このように正負の電荷が極めて短い距離で向かい合って形成される構造を「電気二重層」と呼ぶ。電気二重層を利用することで、通常のゲート電極を用いる場合よりも高密度に電子や正孔を蓄積できることが特徴。本研究では、この仕組みを利用して WSe_2 中に PN 接合を形成している。



注 5)酸化還元反応、酸化還元窓:

物質の間で電子が受け渡される化学反応を指す。電解質に大きな電圧を加えると、電解質や電極で酸化還元反応が起こり、電気二重層によって蓄積した電荷を安定に維持することが難しくなる。このような顕著な酸化還元反応を起こさずに電解質を安定して使用できる電圧範囲を「酸化還元窓(電気化学的安定窓)」と呼ぶ。本研究では、電解質を低温で凍結してイオンの移動を抑えることで、従来の酸化還元窓を超える高電圧動作を可能にした。



【論文情報】

雑誌名:Small

論文タイトル:Frozen Electric Double Layers Enable Redox-Window-Unlimited Ultrahigh Current Injection in Monolayer Light-Emitting Devices

著者:Koshi Oi (名古屋大学), Hao Ou (東京科学大学), Takahiko Endo (NIMS), Jiang Pu(東京科学大学), Yasumitsu Miyata (NIMS), Akitoshi Nakano (名古屋大学), Taishi Takenobu (名古屋大学)

DOI:10.1002/smll.76581

【報道連絡先】
名古屋大学総務部広報課
TEL:052-558-9735　FAX:052-788-6272
E-mail:nu_research@t.mail.nagoya-u.ac.jp

東京科学大学総務企画部広報課
TEL:03-5734-2975　FAX:03-5743-3661
E-mail:media@adm.isct.ac.jp

科学技術振興機構 広報課
TEL:03-5214-8404　FAX:03-5214-8432
E-mail:jstkoho@jst.go.jp

【JST 事業連絡先】
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
金山　晋司(かなやま　しんじ)
TEL:03-3512-3531　FAX:03-3222-2066
E-mail:crest@jst.go.jp