

電圧で制御できる「キラル発光トランジスタ」

— 3D ディスプレイなどへの応用が期待 —

1. 発表者：

張 奕勁 (ちょう えきけい) (東京大学大学院 工学系研究科 物理工学専攻 博士課程 2年)

岡 隆史 (東京大学大学院 工学系研究科 物理工学専攻 講師)

鈴木 龍二 (東京大学大学院 工学系研究科 物理工学専攻 博士課程 1年)

叶 劍 挺 (いえ じゃんていん) (Groningen 大学 Zernike 先端物質科学研究所 准教授)

岩佐 義宏 (東京大学大学院 工学系研究科 附属量子相エレクトロニクス研究センター・物理工学専攻 教授 / 理化学研究所 創発物性科学研究センター 創発デバイス研究チーム チームリーダー)

2. 発表のポイント：

- ◆従来の方法では困難と考えられていた、電圧によって円偏光 (注 1) 光源を制御することに成功。
- ◆円偏光光源の制御は、二セレン化タングステンの電界効果トランジスタ (注 3) によって実現。
- ◆3D ディスプレイなどに応用できる集積デバイスへの展開が可能。

3. 発表概要：

すべての光は右回り円偏光 (注 1) と左回り円偏光の重ね合わせでできている。円偏光光源は、現在、3D ディスプレイ (表示された映像が立体的に見えるディスプレイ) に一部使用されており、将来的には量子コンピュータへの応用が期待されている。しかし、従来の円偏光を生成・制御する手法では、円偏光光源の微細化に限界があり、電場によって制御することは困難だった。

東京大学大学院 工学系研究科 附属 量子相エレクトロニクス研究センターの岩佐義宏教授 (独立行政法人 理化学研究所創発物性科学研究センター 創発デバイス研究チーム チームリーダー兼任) 率いる研究グループは、同研究科物理工学専攻 岡隆史講師、オランダのフローニンゲン (Groningen) 大学 叶劍挺准教授らと共同で、新たな原子膜材料 (注 2) として注目される二セレン化タングステン (WSe_2) の電界効果トランジスタ (FET、注 3) を用いて、電圧によって左右の回転方向を制御可能な円偏光光源を実現した。

電圧によって制御可能な円偏光光源は、3D ディスプレイや量子情報の担体として非常に期待されており、物質科学、フォトニクスの両面から研究が盛んに行われてきた。本成果は WSe_2 の特異な構造と電子の状態を利用し、電圧によって左回りと右回りの円偏光を切り替えることが可能な円偏光光源の原理を提案・実証するものである。

本研究成果は、米国科学雑誌『*Science*』の速報版 (Science Express 平成 26 年 4 月 17 日版) に掲載される。

4. 発表内容：

① 背景

光は偏光という自由度を持っており、すべての光は右回り円偏光と左回り円偏光の重ね合わせでできている。この円偏光自由度は 3D ディスプレイを実現するうえで重要な働きを担っているだけでなく、量子コンピューティングの分野においては情報の担体として非常に期待されている。現在実用化されている円偏光光源のほとんどは光学素子を用いて円偏光の生成と制御を行っているが、この手法では集積化へ向けた光源の微細化や簡便な偏光制御（主に電場による制御）を実現するのは困難である。そのため、光学素子に依存しない円偏光光源の開発が盛んに行われており、その代表例は、スピン軌道相互作用の大きい半導体を用いたスピン LED（注 4）、らせん構造を有する物質を利用した有機 EL（エレクトロ・ルミネッセンス）である。しかしながら、前者では磁場を必要とし、後者では円偏光を外から加えた電圧（外場）によって制御することはもともと前提とされていないなど、簡便な偏光制御の点から原理的な問題を抱えている。そのような、外場制御型の円偏光光源は、材料科学、デバイス分野での開発ターゲットの一つになっている。

円偏光発光の起源はキラリティである。キラリティとは右手と左手のように、似た形なのに向きが違っている状態を指す。例えば、スピン LED では磁性が、有機 EL では有機物のらせん構造がキラリティをもたらしている。スピン LED や有機 EL では片方のキラリティのみが存在するが、近年、両方のキラリティが内在されている物質が数多く知られるようになってきた。その代表例がポストグラフェン材料（注 2）として期待されている遷移金属カルコゲナイド（本研究で用いた WSe_2 はその一例）である。この内在したキラリティの対称性を電氣的に制御することで、外場で制御できる円偏光光源が実現できる可能性がある。

② 研究内容（具体的な手法など詳細）

WSe_2 の FET は、粘着テープ（セロハンテープ）を用いてグラフェンの FET と同様な方法によって作製された。大きさは数ミクロン角程度である。今回は、ゲート絶縁膜として、従来の二酸化ケイ素 (SiO_2) や酸化アルミニウム (Al_2O_3) などの酸化膜ではなく、イオン液体による電気二重層（注 5）を用いた。この手法によって、FET のチャンネル内に誘起できる電荷の密度を飛躍的に向上させることができ、デバイス動作の極限状態に簡単に到達できる。図 1 は、今回作製したデバイスの模式図である。

WSe_2 は、電子が抜けることによって生じる正の電荷（正孔）も注入できる両極性型の FET 動作をすることが知られているため、FET に適切なゲート電圧を加えることによって PN 接合を形成した。PN 接合とは、正電荷が蓄積した領域（P 領域）と、負電荷の蓄積した領域（N 領域）が接している状態である。一般的な PN 接合は半導体結晶中に不純物を導入することで形成されるが、今回の特徴は FET におけるゲート電圧によって PN 接合を形成したことにある。この PN 接合をダイオード（LED）とみなし、順方向電圧を加えると電流注入発光が起こり、それが円偏光していることを発見した（図 2）。

この PN 接合は、電圧によって形成されたものであるため、加える電圧の符号を反転すると PN 接合の向きが反転し、流れる電流も逆になる。この時、円偏光の向きも反転することが実験的に明らかになった（図 3）。従来の理論では電流を流したことによる円偏光発光を説明することはできなかったが、本研究では、外場が存在するときの電荷分布のずれを考慮した新たなモデルを構築し、観測された現象が理論的に起こりうることを確認した。

本研究は、電圧による制御が可能な微小円偏光光源を、従来とは全く異なる原理、すなわち物質に内在するキラリティを利用して実現する原理を提案し、実証したものであると結論できる。

③ 今後の展望

本研究により、最近ポストグラフェン材料として注目を集めている原子層物質、二セレン化タングステン (WSe_2) が、原子数層の極薄構造を持ち、円偏光を電場で変えられる発光デバイスとして動作することが明らかになった。現状では、円偏光度の制御はまだ十分なものではないが、デバイス作製技術の向上により、さらに大きな円偏光の度合いを制御できるようになることが期待される。今後、図4の模式図のような「キラル発光トランジスタ」といえる新しいタイプのデバイスとして、高度集積化を通じた応用研究、そして、単一光子源として基礎研究に寄与していくことが予想される。

5. 発表雑誌：

雑誌名：「Science」 (ScienceXpress 平成26年4月17日版)

論文タイトル：Electrically switchable chiral light-emitting transistor

著者：Y. J. Zhang, T. Oka, R. Suzuki, J. T. Ye, and Y. Iwasa

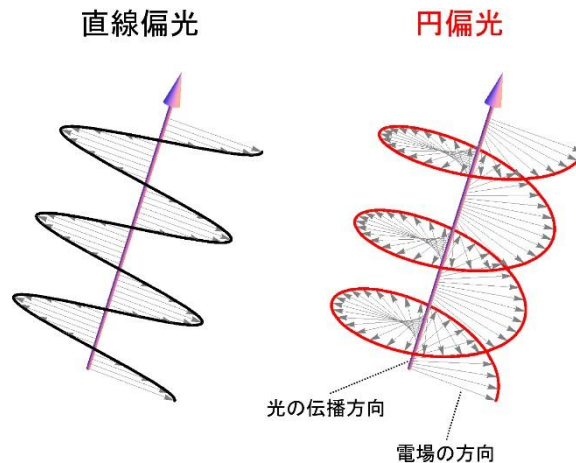
6. 問い合わせ先：

東京大学大学院工学系研究科附属量子相エレクトロニクス研究センター
教授 岩佐 義宏 (いわさ よしひろ)

7. 用語解説：

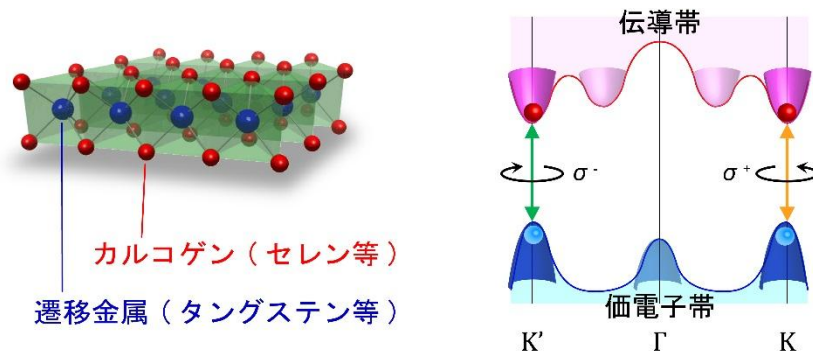
注1： 円偏光

伝播する光には、空間的に変化する電場と磁場が付随し、光の伝播方向、電場、磁場は互いに直行している。電場の方向が常に同一平面内にあり強度が周期的に変化する場合を直線偏光、電場大きさは変わらずその方向が回転しながら伝播する光を円偏光と言う。円偏光では電場がらせんを描きながら光が伝播するが、らせんの向きに応じて右回り円偏光と左回り円偏光を区別する。直線偏光は右回り円偏光と左回り円偏光を1対1の大きさに重ね合わせた光である。



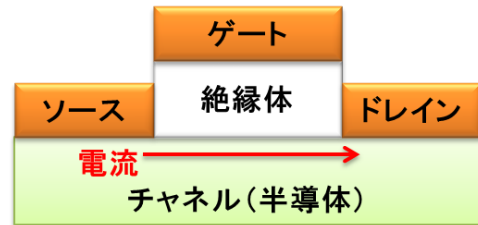
注2： 原子膜材料 / ポストグラフェン材料

グラフェンは2010年のノーベル物理学賞で注目を集めたが、グラフェン同様に原子層1枚あるいは数枚で形成される物質は沢山あり、これらはグラファイトと同様、層状の物質から形成することが可能である。その手法としては、ノーベル賞の対象となった粘着テープを用いた劈開法や、化学気相成長法 (CVD) などがある。特に、二セレン化タングステンをはじめとする遷移金属カルコゲナイドは、グラファイトと類似の結晶構造を持ち、かつグラフェンにはないバンドギャップを有するため、デバイス応用の観点からポストグラフェン材料として注目されている。遷移金属カルコゲナイド内には異なるキラリティに対応する直接遷移型のバンドギャップが複数あり、それぞれが右回りと左回りの円偏光発光(σ^\pm)に寄与する。異なるギャップ間の遷移確率を非等価にすることで全体として円偏光した発光が観測される。



注3： 電界効果トランジスタ (FET)

電圧を加えることで固体表面に電荷を集めることを電界効果ドーピングという。典型的な例としてコンデンサーが挙げられる。電荷量が増えると電流の流れやすさも変化するが、コンデンサーの電極の片方を半導体に置き換えると、その変化量が格段に大きくなる。この原理を応用して電氣的に電流を ON / OFF するスイッチング素子のことを電界効果トランジスタ (右図) と呼ぶ。本研究では半導体材料として二セレン化タングステンを用いた。また、コンデンサーの電極間に挿入する絶縁体として電気二重層を使用し、より小さな電圧でより多くの電荷量を実現した (注5参照)。

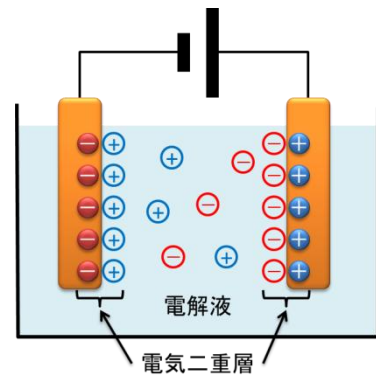


注4： スピンLED

LED とは半導体材料内での電子と正孔の再結合を利用した発光素子である。再結合過程がキララルな物理量と結合しているとき、円偏光が放出される。代表的なものとして電子・正孔の持つスピンのあげられる。すなわち、上向きスピンを持つ電子から放出される光が右回り円偏光を示し、下向きスピンの電子からは左回り円偏光が放出される。この現象は、ヒ化ガリウム (GaAs) に代表される III-V 族半導体に見られ、III-V 族半導体では大きなスピン軌道相互作用による再結合過程がスピン LED の自由度と関連付けられる。この系に外部磁場を加えることにより片方のスピンを選択することができ、放出される光の円偏光の向きを制御することが可能である。

注5： 電気二重層

液体の塩 (えん、イオン液体) あるいは塩を溶かした液体 (電解液) の中に二つの固体電極を入れ、電極間に電圧を加えた時に液体と固体の界面にできる帯電層のこと。塩を構成している陽イオン (正の電荷を持つ) と陰イオン (負の電荷を持つ) はそれぞれ負と正の電圧が加えられている電極に引き寄せられ、最終的に電極界面に整列する。この時、電極内ではイオンとは反対の符号を持つ電荷が界面に引き寄せられている。液体中のイオン層と電極内の電荷層をまとめて電気二重層と呼ぶ。二つの電極をそれぞれ注3



にある FET のゲートとチャンネルと見なしたものが電気二重層トランジスタである。固体の絶縁体から電気二重層に替えることにより、チャンネル半導体中に誘起できる電荷の密度と、半導体にかかる電場の大きさを一桁以上大きくすることができる。

8. 添付資料：

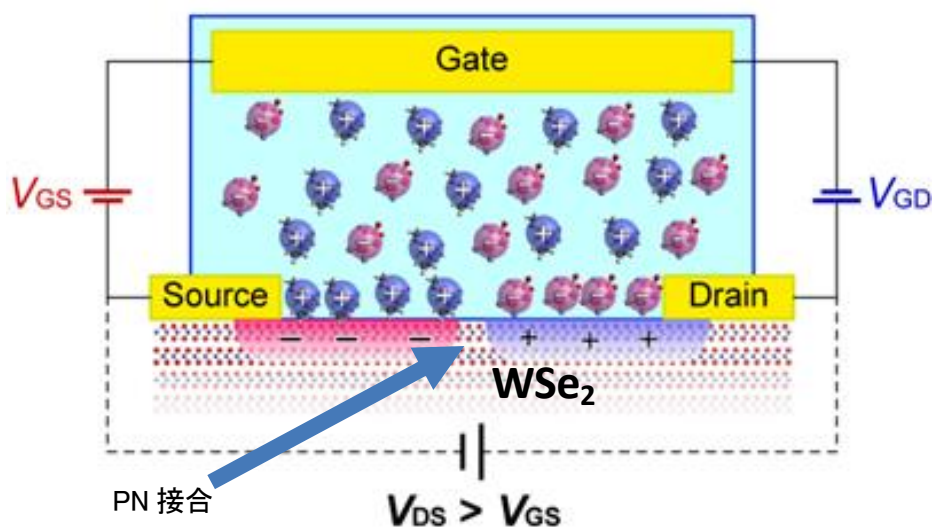


図1：イオン液体を用いた両極性 FET のデバイス構造

今回の研究で用いた二セレン化タングステン (WSe_2) を用いた両極性 FET の模式図。 WSe_2 の上面左側、ソース電極よりが N 領域に、右側ドレイン電極側が P 領域になり、中央で接して PN 接合を形成している。ここが発光点になる。

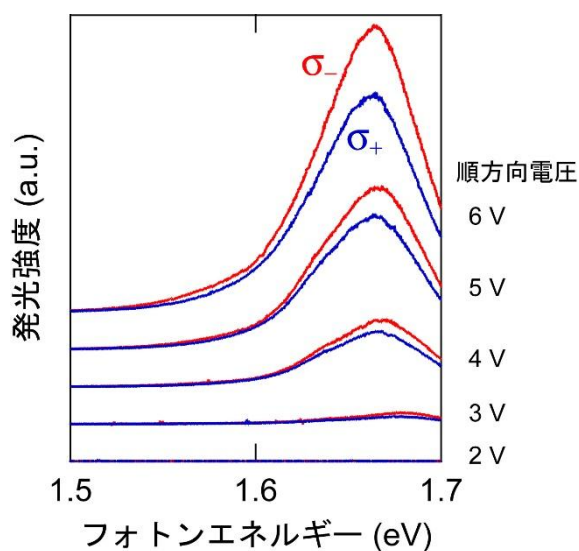


図2：二セレン化タングステンの電界発光スペクトル

σ_+ は右回りの円偏光、 σ_- は左回りの円偏光を表す。順方向電圧を増してゆくと、発光強度が大きくなり、右回り成分と左回り成分の強度の違いが顕著になる。

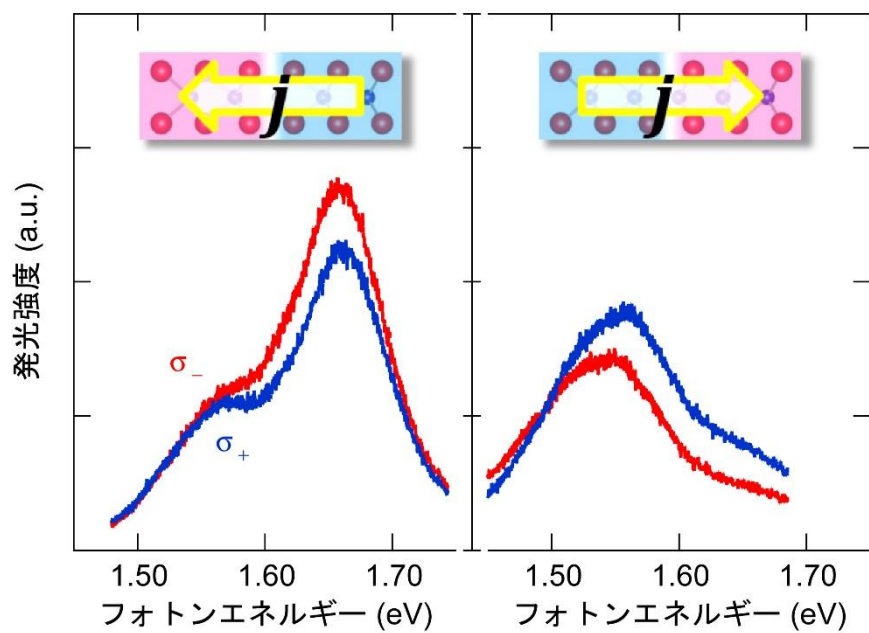


図 3 : 電圧の向きに依存した二セレン化タングステンの電界発光スペクトル

二セレン化タングステン (WSe_2) の電界発光スペクトルが加える電圧の方向に依存して、円偏光度 ($\sigma+$ 偏光の強度と $\sigma-$ 偏光の強度の比) が逆転している。

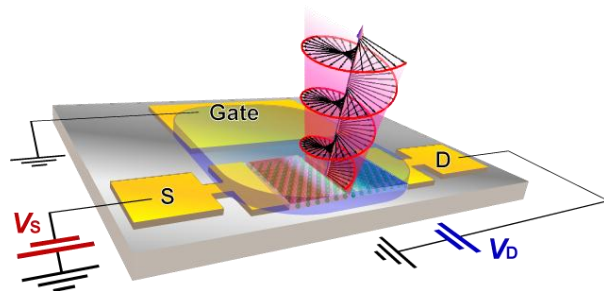


図 4 : キラル発光トランジスタの模式図