

遷移金属カルコゲナイド2次元結晶 —超伝導から円偏光発光素子まで—

張 奕 勁 〈東京大学大学院工学系研究科〉

岩 佐 義 宏 〈東京大学大学院工学系研究科〉

日常の範囲を超えて物質を小さくしていくと、それまでとは全く違った性質が現れる。例えば、黒鉛（グラファイト）は、身近なところでは鉛筆の芯をはじめとして広く使われているが、数ナノメートル（ 10^{-9} m）程度まで薄くすることで最先端の物理現象の舞台になる。グラファイトは層状の物質であり、一層分を取り出したものはグラフェンと呼ばれる。2004年に初めてグラフェンの抽出に成功すると、スコッチテープで剥がすだけというその簡便さも相まってグラフェンの研究が世界的に進展した。グラフェンの特徴はそのバンド構造にある。フェルミ準位近傍にはディラックコーンと呼ばれるバンドギャップのない線形分散があり、電子は質量のないフェルミ粒子のように振る舞う。これにより、室温における量子ホール効果など顕著な量子現象が現れ、数多くの物理学者・材料科学者を引きつけた。ナノ物質の新たな側面を引き出したグラフェンの研究に対して、2010年にノーベル物理学賞が授与されたことは記憶に新しい。

グラフェンにおける新物性の出現は、何層も積み重なった3次元的なグラファイトから単層という純粋に2次元的なグラフェンへの変化に由来する。同様の効果は層状物質に普遍的に期待できるものであり、スコッチテープ法はその確立から程なく多種多様な層状物質へと応用されるようになった。その中でも、遷移金属カルコゲナイド（Transition Metal Dichalcogenide; TMD）と呼ばれる物質が有名である。本稿では、TMDをベースにした、単層ないしは数層の2次元結晶における電界効果物性について解説する。

単層TMDはグラフェンと非常によく似た結晶構造を持っているが、グラフェンと異なりディラックコーンにギャップが開いて半導体になっているという違いがある。バンドギャップの存在は、ON/OFF比が 10^8

以上というスイッチング性能の高い電界効果トランジスタ（Field Effect Transistor; FET）動作を可能にした。さらに、TMDを電気二重層トランジスタ（Electric Double Layer Transistor; EDLT）と呼ばれる新しい種類のFETと組み合わせると、高いON/OFF比に加えて電界効果による超伝導転移も誘起することができる。EDLTによって観測された超伝導転移温度 T_c は、ゲート電圧によるキャリア数の増加とともに上昇するが、最高で10.5 Kに達した後、降下する。すなわち、 T_c は状態密度とともに上昇するのではなく、あるキャリア濃度で最適値を持つのである。

一方、バンドギャップの存在はTMD単層が反転対称性のない結晶構造を持っていることに由来するが、この対称性の破れは他の効果ももたらす。TMDは複数のフェルミポケット（バレーと呼ばれる）を持っているが、対称性の破れのためにこれらバレーが上向き/下向きスピンのように電荷に新しい自由度を与える。同時に、バレー自由度を光の左右の円偏光によって制御することが可能になる。ギャップの大きさは可視光領域の光のエネルギーに対応しており、光・バレー物性をを用いたデバイス応用も期待できる。例えば、TMD-EDLTが両極性トランジスタ動作を示すことを応用すると、円偏光発光ダイオードを作ることができる。さらに、この発光の偏光方向は電流の向きによって制御することができる。この電気的な制御性は、現存する他の円偏光発光素子では実現できないユニークなものである。

以上のようにTMD 2次元結晶は多くの可能性を秘めた物質であるが、EDLTと組み合わせることによってその可能性を最大限に引き出すことができると期待される。TMDには様々な物質が存在するため、今後、広範囲にわたる研究が待たれる。

—Keywords—

遷移金属ダイカルコゲナイド（TMD）:

遷移金属（transition metal）と酸素以外の第16族元素（=chalcogenide、カルコゲナイド=S, Se, Te）の化合物。化学式は MX_2 （X=S, Se, Te）と表され、遷移金属元素MはMo（モリブデン）、W（タングステン）などが占める（ダイカルコゲナイド（dichalcogenide）のdiは化学組成比を示す）。これらの物質群は層状構造をしており、最近になって剥離法による単一原子層の生成が可能となった。

電界効果トランジスタ（FET）:

外部から取り付けたゲート電極の電圧を制御することで、電極直下の伝導体のキャリア（電子またはホール）の濃度を変化させ、伝導特性を制御する素子。

両極性トランジスタ:

ゲート電圧によって半導体中のキャリアを、電子からホールへと切り替えることができる電界効果トランジスタ（FET）。正のゲート電圧を印加すると電子が、負のゲート電圧を印加するとホールが、それぞれキャリアとなる。伝導路の両端に非常に大きな電位差を設けると、実効的なゲート電圧が伝導路の場所に依存するようになり、電子とホールが同時に誘起されることでPN接合が生成される。ここに電流を注入すると発光させることができる（発光FET）。発光FETは発光ダイオードと異なり、電圧の向きによってPN接合の向きを反転させることができる。この性質が本研究で取り扱う発光素子の電気的偏光制御にあたって鍵となる。

