

原子膜半導体のスピン機能開拓に前進

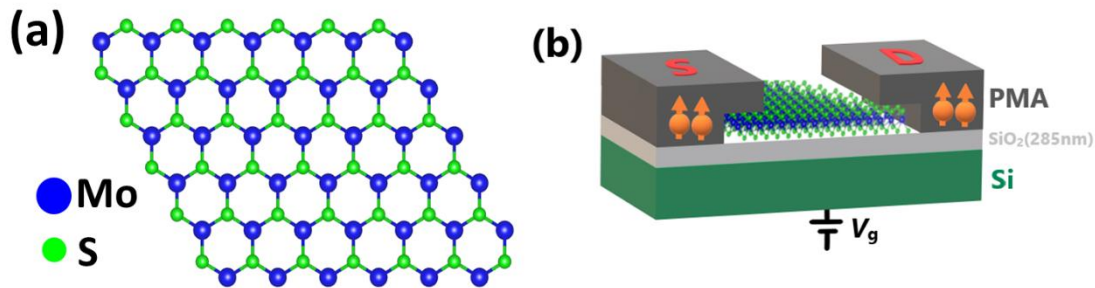
～原子膜半導体 MoS_2 中のスピン情報を取り出す際の障壁高さを 1/10 に低減～

概要

京都大学大学院工学研究科電子工学専攻の Sachin Gupta 特定助教、白石誠司教授らのグループは東京都立大学大学院理学研究科の宮田耕充准教授らと共同で、次世代半導体材料の有力な候補物質である原子膜半導体である遷移金属ダイカルコゲナイド(TMD)の 1 つ、二硫化モリブデン(MoS_2)中に内在するスピン情報を取り出す際の障壁高さを 1/10 に低減することに成功しました。

原子膜物質とは原子層一層で構成される究極のナノ物質の総称ですが、特に近年では半導体となる原子膜物質である TMD に強い関心が集まっており、世界的に激しい研究競争が行われています。白石教授らは近年この TMD 中に内在するスピン情報を効率よく取り出すことで低エネルギー消費の演算を実現するための研究を推進していますが、この TMD 中のスピン情報を取り出す障害となっていたのが、TMD とスピン情報を計測するために必要な磁石の界面に存在する高い障壁（ショットキー障壁）でした。今回、白石教授らは宮田准教授らと共同で、気相成長法によって作製した品質のよい MoS_2 上にコバルト(Co)と白金(Pt)からなる多層膜を新たに成長させることで、従来比でこの障壁高さを 1/10 にすることができました。本成果によって TMD 内部のスピン情報を活用する「TMD スピントロニクス」研究が更に加速し、低エネルギー消費演算が実現されることが期待されます。

本成果は、2021 年 2 月 5 日に英国の国際科学誌「NPG Asia Materials」にオンライン掲載されました。



(a) 本研究で用いた原子膜半導体である二硫化モリブデン(MoS_2)の構造図

(b) 本研究で作製した素子の模式図。 MoS_2 中に存在する、膜面に垂直なスピンを取り出すために、やはり垂直なスピン構造を持つ垂直磁化膜と呼ばれる薄膜を成長させた。垂直磁化膜は Co と Pt から成る多層膜であり、この垂直磁化膜と MoS_2 の間に存在する障壁の高さを従来比で 1/10 に低減させることに成功した。

1. 背景

原子膜物質とは原子層一層で構成される究極のナノ物質であり、2010年に原子膜物質であるグラフェンに関する研究にノーベル物理学賞が与えられて以来、極めて盛んに研究されている物質です。特に近年では半導体となる原子膜物質である遷移金属ダイカルコゲナイド(略称:TMD)と呼ばれる化合物材料に強い関心が集まっており、世界的に激しい研究競争が行われています。

このTMDは従来、主にその薄さと柔らかさに基づく次世代半導体としての機能の発展に研究の重心が置かれることが多かったのですが、一方でこのTMDはそのスピン軌道相互作用のために内部に特徴的なスピン構造を持つという特徴があります。それ故、スピンを情報媒体として扱うスピントロニクス分野においても急速に関心を集めている物質でもあります。

TMDにおけるスピン構造では、スピニングがTMD平面に対して垂直に立っている点に大きな特徴があります。それ故にTMDの持つスピン構造を計測し内部のスピン情報を効率よく取り出すには、面直スピン構造を持つ強磁性体(FM)である垂直磁化膜と呼ばれる薄膜をTMD上に成長させ、FMとTMDの界面に余分な電子(スピン)障壁が入らない努力が必要です。しかし、これまでそのようなFMの成長例は極めて少なく、また障壁の高さの高い障壁層が入ってしまうという問題も同時に存在していたため、このことがTMDのスピントロニクス機能の発展に必要なスピン素子の創出の大きな阻害要因となっていました。

2. 研究手法・成果

そこで私達の研究グループでは(1)気相成長法を用いた大面積で品質のよい、典型的なTMDである二硫化モリブデン(MoS_2)を用い、(2)垂直磁化膜としてCo/Ptの多層膜、を選ぶことで問題の解決を図りました。多くの場合、原子膜TMDを得るためにはグラフェンでも用いられる剥離法と呼ばれる手法が用いられていますが、この手法では原子膜一層を剥離する過程でTMDへの歪が加わり、その電子構造や結晶構造が変わってしまう可能性がありました。そのため、成長条件によって自然に原子膜一層のTMDが成長できる気相成長法を選択しました。また、垂直磁化膜としては熱処理などの余分な処理が必要ないコバルト(Co)と白金(Pt)からなる多層膜・Co/Ptを選択しました。実は当初Co/Ptがここまで障壁高さを下げられることは期待していませんでしたが、実際に素子を作製し障壁高さを測定してみると、従来の結果よりも障壁高さを1/10にまで低減でき、ほぼFMと MoS_2 の間に障壁のない状態を作れることがわかりました。今回、ここまで障壁高さを下げられた理由はいくつか考えられますが、気相成長法によるTMDを用いたことでその電子構造が維持されたことや、Ptが比較的周囲の材料からの影響で電子構造を変えやすい材料であることなどが考えられます。本成果によって、 MoS_2 などのTMD材料が本質的に持っているスピン情報を効率よく外部に取り出すことが可能となり、「TMDスピントロニクス」という新研究領域が加速的に発展することが期待されます。

3. 波及効果、今後の予定

今後求められる研究成果としては、実際にTMDの持っているスピン情報を取り出し、低エネルギー消費のスピン演算に発展させていくことが求められています。その実現のためには、スピン情報が非保存量であるために効率のよい手法で何らかの保存量(電荷や光など)に変換していく研究が必須です。また、TMD中のスピン情報は熱的に擾乱を受けることも知られており、その擾乱を避けながらスピン情報を取り出す工夫も必要です。TMDのスピン情報を演算に用いる「TMDスピントロニクス」の本格的飛躍にはまだ時間が必要ですが、本成果はそのために重要な一里塚であり、さらなる研究の発展を目指していきます。

4. 研究プロジェクトについて

本研究を遂行するにあたり、科学研究費補助金・基盤研究（S）「半導体ナノスピントロニクス」、同・新学術領域研究「ナノスピン変換科学」、JST-CREST（二次元機能性原子・分子薄膜の創製と利用に資する基盤技術の創出）「原子層ヘテロ構造の完全制御成長と超低消費電力・3次元集積デバイスの創出」の支援を受けました。ここに謝意を表します。

<用語解説>

・遷移金属ダイカルコゲナイド：モリブデン(Mo)やタングステン(W)などの遷移金属元素と、硫黄(S)やセレン(Se)、テルル(Te)などのカルコゲン元素からなる化合物の総称。本研究で用いた MoS_2 は特に固体潤滑剤として非常に有名です。

・スピン軌道相互作用：物質中のスピン角運動量（後述）と軌道角運動量の相互作用であり、現代の物性物理学において極めて重要な役割を果たしています。中でも TMD 中でのスピン軌道相互作用は、TMD を構成する元素間の電界によって磁場を発生させ、それが原子膜の膜面に垂直方向のスピンを生んでいます。

・スピン：スピン角運動量とも言われ、電子の持つ電荷と並んで重要な内部自由度であり、磁石の持つ磁性の源でもあります。スピンはアップとダウンの2値を持つため、情報を担うことが可能です。

・スピントロニクス：電子の持つスピン角運動量を情報担体として用いようとする研究分野の総称です。1980年代後半の巨大磁気抵抗効果の発見（2007年ノーベル物理学賞）によって創出された分野であり、これまでに磁気ヘッドや磁気メモリなど様々な素子に応用が広がっていると同時に、豊かで新しい基礎物性を内包する研究分野でもあります。

・電子障壁：電子及びその属性であるスピンの異なる物質間を移動する際に感じるバリアのようなものです。障壁形成の主な理由は2つの異なる物質の電子状態の違いによります。この障壁の高さが低いほど効率よく電子・スピンを輸送することができるため、障壁の高さはスピン情報を取り出すために極めて重要な因子になっています。

<研究者のコメント>

2016年以来、遷移金属ダイカルコゲナイド(TMD)という、この魅力的なナノ物質におけるスピン機能をなんとかして開拓したいと思い、研究を続けています。研究開始当初は様々な課題がありましたが、少しずつ解決していくことができ、今回のこの成果によって漸く TMD スピントロニクスという新しい研究分野を本格的に発展させていく基盤が構築できました。これを基軸に一層研究を加速させていきたいと思いを新たにしています。

<論文タイトルと著者>

タイトル Approaching barrier free contacts to monolayer MoS₂ based field effect transistor
(単層膜二硫化モリブデンを用いたほとんどショットキー障壁のない電界効果トランジスタ)

著者 S. Gupta¹, F. Rortais¹, R. Ohshima¹, Y. Ando¹, T. Endo², Y. Miyata² and M. Shiraishi¹

1. 京都大学大学院工学研究科、2. 東京都立大学大学院理学研究科

掲載誌 NPG Asia Materials

DOI <https://doi.org/10.1038/s41427-021-00284-1>