



平成 27 年 12 月 11 日

報道機関 各位

東北大学原子分子材料科学高等研究機構 (AIMR)
東北大学大学院理学研究科
東北大学学際科学フロンティア研究所

電子・正孔対が作る原子層半導体の作製に成功 -グラフェンを超える電子デバイス応用へ道-

【概要】

東北大学原子分子材料科学高等研究機構 (AIMR) の菅原克明助教、一杉太郎教授、高橋隆教授、同理学研究科の佐藤宇史准教授らの研究グループは、グラフェンを超える電子デバイスへの応用が期待されているチタン・セレン (TiSe_2) 原子層超薄膜の作製に成功しました。さらに、1 層の TiSe_2 超薄膜の電子状態を詳細に調べた結果、その特異な金属状態を生み出している原因は、薄膜中の電子と正孔(電子の抜けた孔)^{注1)}が結合して対(ペア)を作っているためであることを見出しました。今回の成果は、グラフェンを超える原子層超薄膜物質の物質設計と開拓に大きく貢献するものです。

本成果は、平成 27 年 12 月 1 日 (米国東部時間) に米科学誌「ACS Nano」オンライン速報版に掲載されました。

問い合わせ先

<研究に関すること>

菅原 克明

東北大学 原子分子材料科学高等研究機構 (AIMR) 助教

Tel : 022-217-6169 E-mail : k.sugawara@arpes.phys.tohoku.ac.jp

<報道に関すること>

清水 修

東北大学 原子分子材料科学高等研究機構 (AIMR)

広報・アウトリーチオフィス

Tel : 022-217-6146 E-mail : aimr-outreach@grp.tohoku.ac.jp

【研究の背景】

TiSe₂ は、チタン(Ti)とセレン(Se)が結合した層状物質で、グラフェンと類似した六角形の結晶構造を持っています(図 1)。近年、これらの層状物質を極限まで薄くした原子層超薄膜で、グラフェンを超える新機能を発現させる取り組みが精力的に行われています。何層にも積層した 3 次元的なバルクの TiSe₂ は、電子と正孔がそれぞれ独立して運動する半金属であると理論的には理解されていますが、実験的には、-70℃付近で半導体から金属へ変化するという特異な性質を示す事が分かっています。一方で、原子層を 1 枚だけ抜き出した TiSe₂ 原子層超薄膜(厚さ 0.65 ナノメートル)がどのような特性を示すかは未解明なままでした。グラファイトと同様な結晶構造を持つ TiSe₂ を原子層まで薄くすることで、グラファイト(多層)からグラフェン(単層)への変化で見出されたような特異な性質(例えば、超高速電子)が発現する事も期待されるため、高品質な TiSe₂ 原子層超薄膜の作製と、その性質の解明が期待されていました。

【研究の内容】

今回、東北大学の研究グループは、分子線エピタキシー法^{注2)}を用いて、グラフェン薄膜上に原子層レベルで精密に制御された高品質な単原子層 TiSe₂ 超薄膜(図 1)を作成することに成功し、その電子状態を角度分解光電子分光^{注3)}(図 2)という手法を用いて精密に調べました。その結果、TiSe₂ 原子層超薄膜は室温では半金属ではなくバンドギャップ^{注4)}をもつ半導体で、薄膜中では電子と正孔がそれぞれ独立に運動している一方、低温では、電子と正孔が相互作用して励起子^{注5)}と呼ばれる強固な対(ペア)を作り、結晶中で新しい電荷の秩序(電荷密度波^{注6)})を形成して特異な金属状態を出現させていることを見出しました。

【今後の展望】

本研究は、ポストグラフェン物質として近年大きな注目を集めている TiSe₂ 原子層超薄膜の作製と、その特異な電子物性の起源となる電子状態を研究したものです。その結果、TiSe₂における特異物性は、電子と正孔が結合して励起子を形成することによって生じることを見出しました。今後、この単原子層 TiSe₂ に対して、電子および正孔の数を調節・制御する方法を確立し、半導体デバイス構築へ向けた材料設計を進めることが期待されます。また一方で、励起子によって出現した電荷密度波を利用したメモリーデバイスなどへの応用展開も急速に進むものと考えられます。

なお、本成果は、科研費基盤研究(A)「スピン ARPES による機能性薄膜ハイブリッドの創出」(研究代表者:高橋 隆)、新学術領域「原子層科学」(領域代表者:齋藤 理一郎)および「トポロジーが紡ぐ物質科学のフロンティア」(領域代表者:川上 則雄)、学際研究重点プログラム「原子層超薄膜における革新的電子機能物性の創発」(研究代表者:高橋 隆)などの援助によって得られました。

【用語解説】

注 1) 正孔

結晶内の電子が欠損することによって、電子の抜けた“孔”があたかも正の電荷をもつように振舞う粒子のこと。ホール(孔)とも呼ばれる。p型半導体では、この正孔がキャリアとして電気伝導を担います。

注2) 分子線エピタキシー法

高品質な単結晶薄膜を作成することができる手法のひとつ。超高真空槽内に設置したいくつかの蒸着源(材料)を加熱等により蒸発させ、対向した単結晶基板の上に堆積させることで、原子レベルで制御された高品質単結晶薄膜が作製できます。

注3) 角度分解光電子分光

結晶に紫外線やX線を照射すると物質の表面から電子が放出されます。放出された電子は光電子と呼ばれ、その光電子のエネルギーや運動量(角度)を測定すると、その電子が元々いた物質中の電子の状態、つまり物質の電子状態が分かります。

注4) バンドギャップ

半導体中で、電子が占有する最高のエネルギー準位と、電子が非占有となる最低のエネルギー準位間のエネルギー差のことです。半導体を電子デバイスとして利用する際の重要なパラメータです。

注5) 励起子

電子と正孔が電氣的相互作用によってペア(対)を作ることで形成される複合粒子のことです。物質の光学的性質に重要な役目を担います。

注6) 電荷密度波

電子がもつ電荷が、結晶の周期性とは異なる周期性を持って規則的に分布する現象です。半導体や金属、超伝導など種々の特異物性の発現に重要な役目をはたすことが知られており、特に低次元性を有する物質に多く見られる現象です。

【参考図】

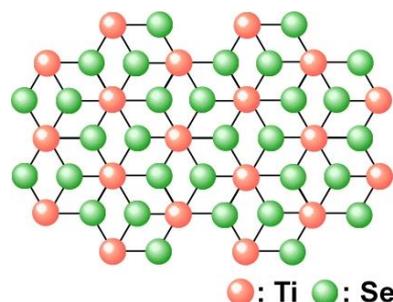


図1: 単原子層 TiSe₂ の結晶構造.

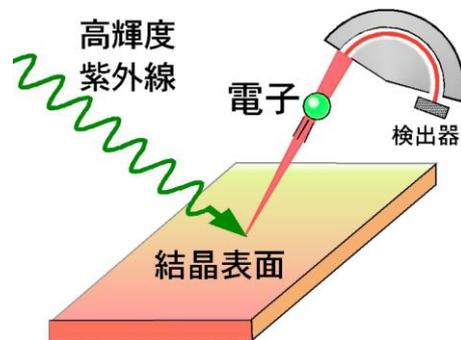


図 2： 角度分解光電子分光の概念図。物質に高輝度紫外線を照射し，放出された光電子のエネルギーと運動量を精密に測定することで、物質の電子状態を決定できる。

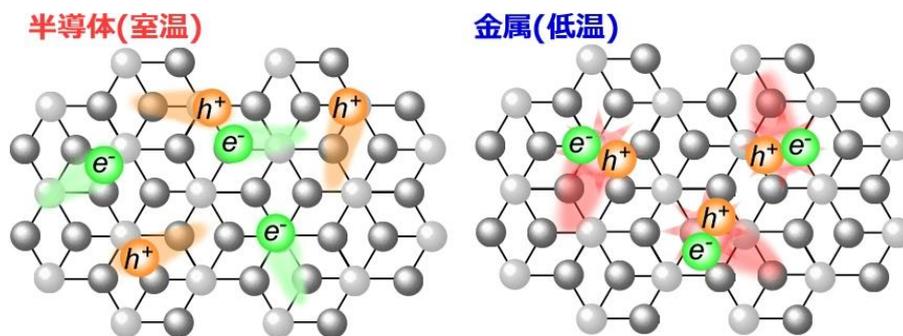


図 3： TiSe_2 原子層超薄膜中における電子と正孔の振る舞い。(左図) 室温では電子と正孔が独立に運動し、薄膜は半導体となる。(右図) 低温では、電子と正孔は電気的相互作用により励起子を形成し、薄膜に特殊な金属状態を発現させる。

【論文情報】

Katsuaki Sugawara, Yuki Nakata, Ryota Shimizu, Patrick Han, Taro Hitosugi, Takafumi Sato, and Takashi Takahashi, “Unconventional Charge-Density-Wave Transition in Monolayer $1T\text{-TiSe}_2$ ”, *ACS Nano* (2015), DOI: 10.1021/acsnano.5b06727.

【発表雑誌】

ACS Nano オンライン速報版、2015年12月1日公開（米国東部時間）

【問い合わせ先】

<研究に関すること>

菅原 克明 (すがわら かつあき)

東北大学 原子分子材料科学高等研究機構 助教

Tel : 022-217-6169 E-mail : k.sugawara@arpes.phys.tohoku.ac.jp

<報道に関すること>

清水 修 (しみず おさむ)

東北大学 原子分子材料科学高等研究機構 広報・アウトリーチオフィス

Tel : 022-217-6146 E-mail : aimr-outreach@grp.tohoku.ac.jp