

令和 4 年 6 月 10 日現在

機関番号：12401

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18H01822

研究課題名(和文) 高蒸気圧原料による低温ファンデルワールス・エピタキシー

研究課題名(英文) Low-temperature van der Waals epitaxy using high vapor pressure sources

研究代表者

上野 啓司 (Ueno, Keiji)

埼玉大学・理工学研究科・教授

研究者番号：40223482

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,700,000円

研究成果の概要(和文)：層状遷移金属ダイカルコゲナイドの単結晶超薄膜を低い基板温度でエピタキシャル成長することを目的として、反応性の高い高蒸気圧前駆体化合物を原料とする分子線エピタキシー装置を立ち上げ、成膜実験を進めた。その結果、二硫化タングステン、二硫化ニオブおよび二セレン化ニオブ薄膜を、合成雲母基板上などにエピタキシャル成長することに成功した。

また、原子層堆積装置を用いた成膜実験では、熱酸化シリコン基板上に予め微小な金属薄膜を蒸着することにより、結晶性の二硫化タングステン薄膜が、金属薄膜上だけでなくその外部の基板表面上においても、金属薄膜が無い場合と比べて低い温度で成長可能であることが見出された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

遷移金属ダイカルコゲナイト薄膜をエピタキシャル成長するためには、これまでの固体原料を用いる研究では高い基板温度が必要であったが、反応性の高い高蒸気圧前駆体を利用することや、基板表面に前もって金属薄膜を蒸着することで、成長温度を低くすることが可能となり、薄膜成長に利用可能な基板の種類を大幅に増やすことが可能になった。これにより、遷移金属ダイカルコゲナイト薄膜の応用可能性が向上し、今後の高機能新規半導体素子の開発にもつなげる成果が得られたと言える。

研究成果の概要(英文)：In order to epitaxially grow single-crystalline ultra-thin films of layered transition metal dichalcogenides at low substrate temperatures, we have set up a molecular beam epitaxy system using highly reactive high-vapor pressure precursor compounds as source materials and proceeded with deposition experiments. As a result, tungsten disulfide, niobium disulfide, and niobium diselenide thin films were successfully epitaxially grown on synthetic mica and other substrates.

In deposition experiments using an atomic layer deposition system, it was found that crystalline tungsten disulfide thin films can be grown not only on the metal film but also on the external substrate surface at lower temperatures than those without the metal film, by depositing a small metal film on a thermally oxidized silicon substrate in advance.

研究分野：固体・薄膜表面物性

キーワード：層状物質 ファンデルワールス・エピタキシー 遷移金属ダイカルコゲナイド エピタキシャル成長
原子層堆積法 高蒸気圧前駆体 遷移金属二硫化物 遷移金属二セレン化物

1. 研究開始当初の背景

層状構造を持つ物質(層状物質)の1単位層やその数層積層膜、いわゆる「原子膜」は、2004年のグラフェン原子膜形成報告以降、基礎物性探索に加え、光・電子素子材料としての特性探求が活発に行われている。グラフェンが従来半導体よりも数桁高い移動度を示す一方、グラフェンに無いバンドギャップを持つ層状半導体原子膜、例えば MoS_2 、 WSe_2 といった遷移金属ダイカルコゲナイド(TMDC)原子膜は、電界効果トランジスタ(FET)素子や光電変換素子の材料として利用できる。TMDC原子膜は1nm以下の厚さの1単位層でもFETチャネルとして機能し、柔軟性や表面安定性といった、SiやGaAs等の3次元的結晶構造を持つ半導体には無い特徴を活かすことで、新規な高機能素子の開発が期待されている。このような素子応用には、高い再現性を示すTMDC原子膜形成手法や、pn接合形成あるいは異種薄膜のヘテロ積層によるキャリア伝導制御が求められる。高品質なTMDC原子膜形成やそのヘテロ積層の手法としては、バルク単結晶からの機械的剥離転写、即ちトップダウンの手法が基礎物性探索では用いられている。しかしこの手法は形成できる試料が小さく、生産効率も低いため素子応用には向かない。そこでボトムアップ的な「薄膜成長」手法が期待されているが、現実には多くの問題が存在する。

TMDC単結晶薄膜成長やヘテロ積層の研究は、1984年に小間らによって、分子線エピタキシー法(MBE)による MoS_2 基板上への NbSe_2 薄膜の成長が報告されたのが世界最初である。小間らは約9%格子定数が異なる層状物質間でヘテロエピタキシャル成長が可能であることを実証し、「ファンデルワールス・エピタキシー」と命名した。その後、多くの層状物質間でファンデルワールス・エピタキシーが実証されている。一方、2004年以降に活発化したTMDC薄膜成長研究では、金属酸化物とカルコゲン元素単体を原料とする化学気相成長(CVD)法が多く報告された。CVDはMBEと比べて安価簡便に成膜装置を構築できるが、成膜の再現性や基板面内均一性が低い。また金属酸化物原料を用いる場合、 800°C 以上の成膜温度が必要なため、薄膜に欠陥が生じやすい。さらに大きな問題は、このような高いCVD成膜温度に耐えられる基板が限られることである。バルクTMDCは 800°C では分解が始まる。よく用いられるのは熱酸化膜付Siウエハーだが、その表面はアモルファスであり、成長した各TMDCドメインの面内結晶方位が揃わない。方位の揃ったエピタキシャル薄膜を得るために、6回対称な表面構造を持つサファイア(0001)面を用いる研究も行われているが、酸化物表面は層状物質劈開面と比べて活性で、成長膜との相互作用が強く、格子定数も整合しない。そのため成長するTMDC薄膜は歪んだり、欠陥が生じたりしてしまう。高耐熱性と表面不活性、素子応用上必要な絶縁性を併せ持つ単結晶基板は、現状では六方晶窒化ホウ素に限られるが、その劈開面積はかなり小さい。一方、従来のMBE法でも、Mo、Wなどの高融点金属を分子線源とする場合には高成膜温度が必要となり、CVDと同じ問題が生じる。これらの問題を解決するための「TMDC薄膜成長の基板温度を、基板が耐えられる温度まで下げるにはどうすれば良いか」という問いが、本研究の背景と動機である。

2. 研究の目的

上記のように新しいナノエレクトロニクス材料として期待されているTMDC原子膜の単結晶ヘテロエピタキシャル成長、いわゆる「ファンデルワールス・エピタキシー」を、低い基板温度(400°C 以下)で実現することを目指す。そのための基板として、単結晶基板清浄表面に存在するダングリングボンドが規則的に終端され不活性化した基板や、雲母等の層状物質基板を用いることを試みる。さらに、蒸気圧と反応性の高い有機金属化合物や有機カルコゲン化合物を前駆体原料として用いるMBE法により、低温での結晶性薄膜成長を試みる。MBE成長中のその場構造観察や、試料取り出し後の各種構造・物性測定により、得られた薄膜試料の評価を行い、薄膜成長条件にフィードバックすることによって、TMDC薄膜品質の向上を目指す。

3. 研究の方法

本研究では、TMDCの高品質な単結晶薄膜を、低い基板温度で大面積な基板上にヘテロエピタキシャル成長することを目指して、主に以下の研究課題を進めた。

- (1) 高蒸気圧を有し、反応性が高い有機金属化合物および有機カルコゲン化合物原料をMBE成長で利用しTMDC薄膜を低温成長するために、前駆体原料精密供給装置を作製し、現有のMBE装置に取り付けて駆動する。
- (2) 大面積単結晶TMDC薄膜をエピタキシャル成長(ファンデルワールス・エピタキシー)するための、ダングリングボンドが規則的に終端された表面不活性化単結晶基板を探索する。
- (3) (2)の基板上へ、(1)のMBE装置を用いてTMDC薄膜を低温ファンデルワールス・エピタキシー成長し、得られた薄膜を反射高速電子線回折法(RHEED)、ラマン分光法、X線光電子分光法(XPS)などにより評価し、得られた結果をフィードバックすることで成長条件を最適化する。
- (4) MBE成長で得られた薄膜と構造・物性を比較検討するための大型TMDCバルク単結晶の作製を行う。特に、大型結晶が得られていない β 相 MoTe_2 単結晶の成長手法改善を進める。
- (5) TMDC薄膜・バルク単結晶試料の成長手法や物性を理論的方面から探索することを目的として、第一原理計算を行うための計算機システムを立ち上げる。

4. 研究成果

(1) 高蒸気圧前駆体原料を利用した低温ファンデルワールス・エピタキシー

この研究課題では、まず以前から所有していた層状物質薄膜成長用 MBE 装置に、高蒸気圧を有し、反応性が高い有機金属化合物および有機硫黄化合物前駆体を供給する装置を取り付け、TMDC 薄膜のエピタキシャル成長実現を目指した。図 1 に、改造した MBE 装置の模式図を示す。成長する TMDC は WS_2 、 WSe_2 、 NbS_2 、 $NbSe_2$ とし、W, Nb, S 各原料として図 2(a)~(c) に示す化合物前駆体を利用した。これらの前駆体は室温では全て液体で、50~80°C 程度の温度で高い蒸気圧を示し、反応性も高い。そこで、加熱された前駆体容器から空圧バルブを介して、MBE 装置内に適切な量の前駆体蒸気を供給することで、RHEED 観察が可能な真空度を保ったまま、TMDC 薄膜の成長を可能とした。Se 源については、液体前駆体化合物の毒性や取扱いの難しさを鑑みて、従来から装置に備わっていた固体 Se 用 K-cell を用いることとした。

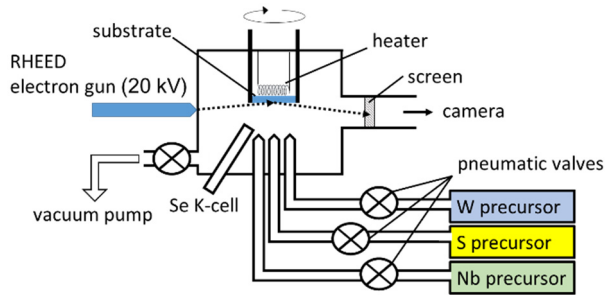


図 1 高蒸気圧前駆体原料供給装置を取り付けた層状物質薄膜成長用 MBE 装置の模式図

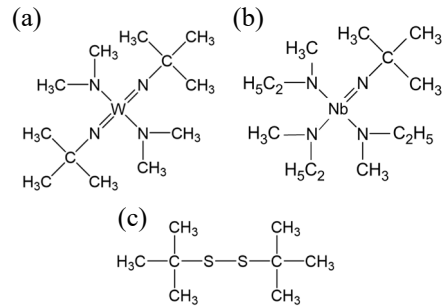


図 2 前駆体として利用した有機金属・有機カルコゲン化合物 (※)

※前駆体化合物の名称：(a) ビス (ターシャリーブチルイミド) ビス (ジメチルアミド) タングステン、(b) ターシャリーブチルイミドトリス (エチルメチルアミド) ニオブ、(c) ジターシャリーブチルジスルフィド

この装置を用い、基板温度や原料供給量、原料供給のタイミング等を適切に制御することにより、結晶性の WS_2 、 NbS_2 、 $NbSe_2$ 薄膜を成長することに成功した (WSe_2 については未実施)。例として、図 3 に示す原料供給タイミングを用い、基板温度を 435 °C として水素終端 Si(111) 基板、サファイア(0001) 基板、天然白雲母基板上に WS_2 薄膜を成長した際の、成長前後での RHEED 像変化を図 4 に示す。成長サイクル数は 750 回とした。

図 3 WS_2 薄膜成長における W, S 各前駆体原料の供給タイミング

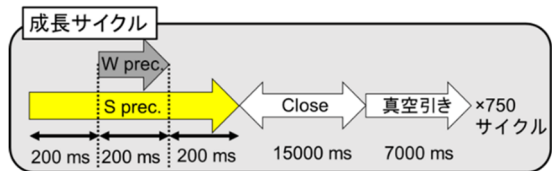
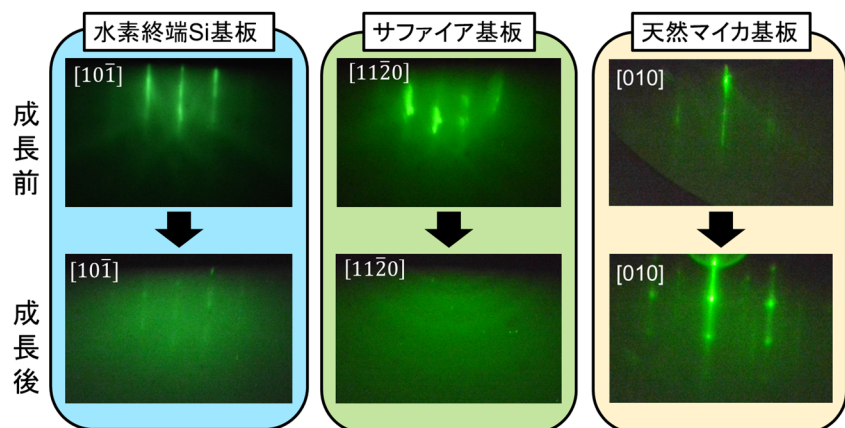


図 4 水素終端 Si(111) 基板、サファイア(0001) 基板、天然白雲母 (マイカ) 各基板上に WS_2 薄膜を基板温度 435°C で 750 サイクル成長した際の RHEED 像変化



これらの RHEED 像の変化、および成長した薄膜試料のラマン分光、XPS 測定の結果から、水素終端 Si(111) 基板上では原料が基板表面に付着しづらく、 WS_2 が成長する前に表面終端水素が脱離し、Si と原料が反応してしまうことが分かった。サファイア(0001) 基板上では、ラマン分光と XPS から WS_2 の形成が確認されたものの、基板表面が活性であることから WS_2 の配向はランダムとなり、リング状の RHEED 像が現れたと考えられる。一方天然白雲母基板上では、この成長温度では成長速度がかなり遅いものの、成長した WS_2 薄膜からのストリーク像が観察された。このストリーク像は基板の回転に対して 6 回対称性を示したことから、 WS_2 薄膜のエピタキシャル成長が実現したといえる。

次により厚く、結晶性が更に優れた WS_2 エピタキシャル薄膜を得るために、薄膜成長後に MBE 装置内で硫黄前駆体を照射しながらアニール処理を行った結果を図 5 に示す。この実験では基板には合成雲母を用い、基板温度 $405^\circ C$ 、成長サイクル数 750 回として成長した WS_2 薄膜に $405^\circ C$ で硫黄雰囲気下アニール処理を施している。

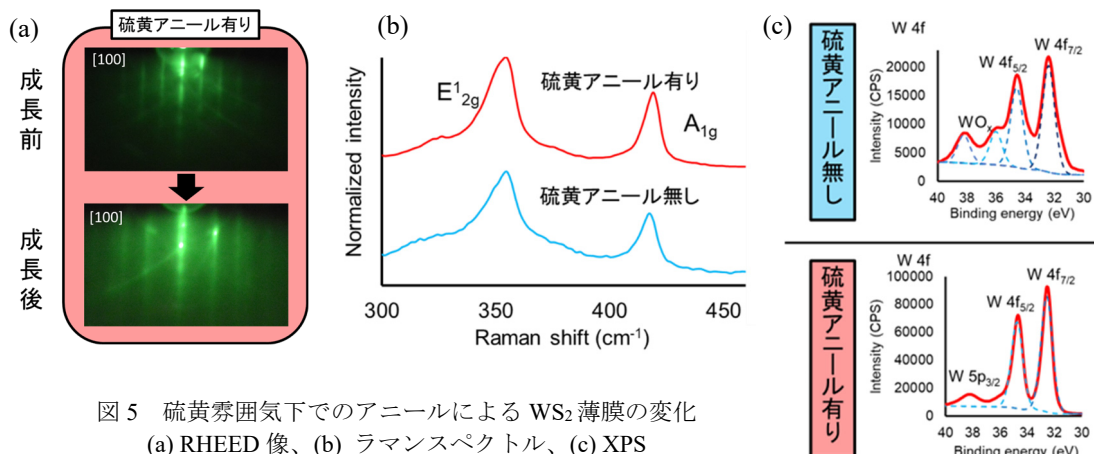


図 5 硫黄雰囲気下でのアニールによる WS_2 薄膜の変化
(a) RHEED 像、(b) ラマンスペクトル、(c) XPS

図 5(a)に示す RHEED 像では、成長温度を低くした結果、雲母基板からの回折像が見えない厚さの WS_2 薄膜が成長したにもかかわらず、明瞭な、スポットがほとんど無いストリーク像が得られており、低温で成長・硫黄アニールした WS_2 薄膜が良好な単結晶性を有していることが分かる。また(b)のラマンスペクトルではピークの半値幅が硫黄アニールにより減少しており、薄膜の良好な結晶性が示されている。さらに(c)の W 4f 内殻励起 XPS 測定では、未反応前駆体に起因する W 酸化物のピークが硫黄アニール後は消失している。これらの結果から、硫黄アニール処理により未反応 W 前駆体の反応が進み、薄膜の結晶性がより改善されることが判明した。

同様な薄膜成長実験をこれまで行ってきた結果、 WS_2 薄膜に加えて、 NbS_2 、 $NbSe_2$ 薄膜についても、合成雲母基板上でエピタキシャル成長が確認されている。新型コロナウイルス流行の影響により、他の TMDC 薄膜については本装置でのエピタキシャル成長実験を行うことが研究期間内にはできなかったが、 WSe_2 、 MoS_2 、 $MoSe_2$ 、 $MoTe_2$ 、 WTe_2 の各薄膜成長については既に原料を調達しており、現在実験準備を進めているところである。

(2) 基板表面への微小金属薄膜堆積による、より低い温度での結晶性 TMDC 薄膜成長

(1)で示した MBE 装置を用いた実験では、 $405^\circ C$ の成長温度で結晶性に優れた WS_2 薄膜を成長することに成功したが、さらに成長温度を低くするために、図 6 に示す原子層堆積法(ALD)による薄膜成長装置を用いて、低温成長の条件探索を進めた。この装置では、図 2(a), (c)に示した W, S 各前駆体原料の蒸気を、管状炉内で加熱された熱酸化 SiO_2/Si 基板上に空圧バルブを介して交互に供給することで、 WS_2 の成膜を行う。

本装置を用いた以前の実験では、成膜温度 $400^\circ C$ で、熱酸化 SiO_2/Si 基板上に WS_2 の結晶性薄膜を成長させることに成功していたが、それより低い温度では結晶性薄膜は得られず、主に未反応前駆体が吸着しただけであった。ところが、 WS_2 薄膜を成長する基板上に、前もってごく狭い面積の金属薄膜を蒸着しておくだけで(図 7)、成長温度 $350^\circ C$ においても、 WS_2 の結晶性薄膜が約 1 cm 角の基板全面に成長することが発見された。図 8 に、微小金属膜の有無によるラマンスペクトルの変化を示す。微小金属膜ありの場合

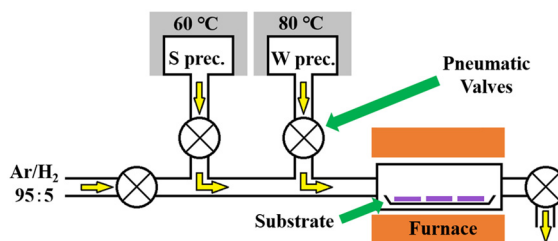


図 6 WS_2 薄膜成長用 ALD 装置の模式図

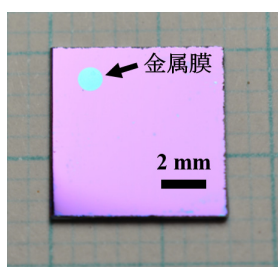


図 7 微小金属薄膜を堆積した熱酸化 SiO_2/Si 基板の写真

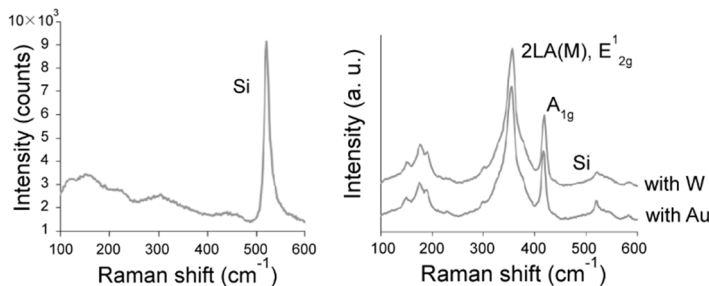


図 8 $350^\circ C$ で ALD 成長した WS_2 薄膜のラマンスペクトル
左：金属薄膜なし、右：微小金属薄膜(W, Au)あり

のラマンスペクトルは、堆積した金属薄膜の外側の、熱酸化 SiO₂ 上に成長した WS₂ 薄膜に対して測定されている。金属薄膜がない場合には、結晶性 WS₂ の成長を示すラマンピークは全く見られないのに対し、金あるいはタングステンの微小薄膜がある場合には、結晶性 WS₂ からのラマンピークが明瞭に観察されている。微小な金属薄膜が、なぜ低い温度で結晶性 WS₂ 薄膜の成長を促すことができるのかについては、何らかの触媒効果をもたらしていると考えられるものの、詳細は現段階では不明である。同様な現象は、図 2(a) の W 前駆体と同様な構造をもつ有機 Mo 前駆体を用いた MoS₂ 薄膜の ALD 成長でも確認されている。

現在、本基盤研究(B)課題に引き続いて 2021 年度から実施している基盤研究(C)課題「触媒効果による層状化合物原子膜の低温単結晶成長実現 (課題番号 21K04826)」において、堆積する金属を様々に変えて ALD 成長を行う実験を進めている。これまでに、成長温度 300°C でも結晶性の WS₂ 薄膜成長が確認され、この成長温度では銅と銀が特に有効であることが判明している。

(3) β相 MoTe₂ の大型バルク単結晶成長の実現

本課題では、MBE 法や ALD 法による成長で得られた薄膜と構造・物性を比較検討するための大型 TMDC バルク単結晶の作製を行い、特にこれまで大型の結晶が得られていなかった β相 MoTe₂ 単結晶の大面积化を実現するための成長手法探索を進めた。

6 族 TMDC の一つの MoTe₂ は、半導体の α相と半金属の β相という、二種類の単位層構造をとることが知られている。α相 MoTe₂ を含む 6 族 TMDC の多くは半導体であるが、β相 MoTe₂ と WTe₂ だけが半金属であり、半金属 TMDC の研究例は半導体 TMDC と比べて少ない。TMDC のバルク単結晶合成では多くの場合、ハロゲンを輸送剤とする化学蒸気輸送法(CVT)が用いられる。CVT による β相 MoTe₂ 単結晶合成では、輸送剤に臭素を用いると、液体であるため真空封入が難しい。一方、固体のヨウ素を用いると、β相 MoTe₂ の異方的な結晶構造に起因して針状結晶になりやすいため、大面积劈開面が得られるような大型単結晶の成長が難しい。そこで本研究課題では、CVT 法で単結晶成長を行う際の条件を様々に工夫することで、大型の β相 MoTe₂ 単結晶合成を試みた。その結果、ハロゲン輸送剤として塩素を用い、輸送剤の量を減らすことで、大きな平板単結晶が得られることが判明した。図 9 に、β相 MoTe₂ 単結晶を輸送剤を変えて CVT 法により成長した結果を示す。輸送剤として TeCl₄ あるいは TeI₄ を用いた場合に、より大面积な結晶が得られることが判明している。さらに偏光顕微鏡を用いた観察から、TeCl₄ を用いて得られた単結晶が、TeI₄ よりも広い範囲にわたって結晶方位が揃うことが判明した。輸送剤として TeCl₄ を用いることの有効性は、(4)で示す理論計算サーバーを用いた NEB (Nudged Elastic Band) 法による反応経路探索計算からも示された。

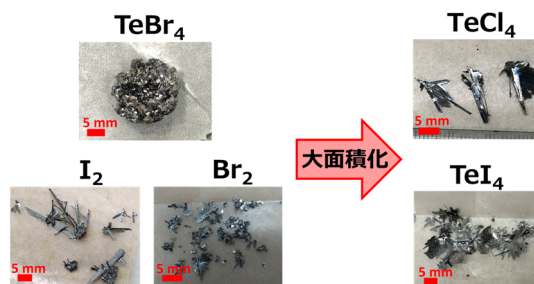


図 9 CVT 成長した β相 MoTe₂ 単結晶において用いた輸送剤が結晶サイズに与える影響

(4) 第一原理計算を行うための計算機システム構築

TMDC 薄膜やバルク単結晶試料の成長手法最適化や、得られた試料の物性 (結晶構造、電子帯構造、光学的特性等) を理論的方面から探索することを目的として、第一原理計算を行うための計算機システムを自前で構築した。立ち上げたシステムの詳細は次の通りである。

- ・ CPU : AMD Ryzen 9 5950X (CPU コア数 16、スレッド数 32、最大 Boost clock 4.9GHz)
- ・ メモリ : 128 Gbyte ・ OS : Linux (Ubuntu)
- ・ 第一原理計算ソフトウェア : Quantum Espresso (<https://www.quantum-espresso.org/>)

この計算機システムを用い、TMDC 単結晶の電子帯構造、不純物添加によるバンドギャップ内準位形成、格子振動およびラマンスペクトル等の計算を行った。また(3)で示したように、TMDC バルク単結晶の CVT 成長における輸送剤の効果について NEB 法を用いた反応経路探索計算を行い、どの輸送材が最も効果的であるか探索し、実験結果との比較を行った。

理論計算結果の例として、図 10 に β相 MoTe₂ 単結晶について計算した電子帯構造と状態密度を示す。半金属性を示す結果が正しく得られている。現在、本計算機システムを用いて、TMDC 薄膜 ALD 成長の最適化を、理論計算の方面から行うための準備を進めている。

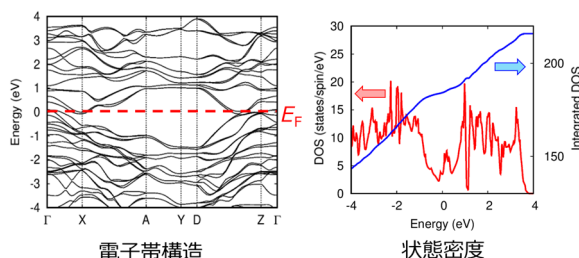


図 10 第一原理計算により得られた β相 MoTe₂ 単結晶の電子帯構造と状態密度

<引用文献>

- ① Y. Ikeda and K. Ueno, “Low-temperature growth of crystalline tungsten disulfide thin films by using organic liquid precursors”, Jpn. J. Appl. Phys., 59, 2020, SCCC04.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 上野啓司	4. 巻 72
2. 論文標題 遷移金属ダイカルコゲナイドの構造, 物性, 原子膜形成法	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 化学と工業	6. 最初と最後の頁 335-337
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Ikeda Yukihiko, Ueno Keiji	4. 巻 59
2. 論文標題 Low-temperature growth of crystalline tungsten disulfide thin films by using organic liquid precursors	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 SCCC04 - SCCC04
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7567/1347-4065/ab489a	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Li Mengjiao, Lin Che-Yi, Chang Yuan-Ming, Yang Shih-Hsien, Lee Mu-Pai, Chen Ciao-Fen, Lee Ko-Chun, Yang Feng-Shou, Chou Yi, Lin Yi-Chun, Ueno Keiji, Shi Yumeng, Chou Yi-Chia, Tsukagoshi Kazuhito, Lin Yen-Fu	4. 巻 12
2. 論文標題 Facile and Reversible Carrier-Type Manipulation of Layered MoTe ₂ Toward Long-Term Stable Electronics	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 ACS Applied Materials & Interfaces	6. 最初と最後の頁 42918 ~ 42924
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsami.0c09922	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Fukuda Takumi, Kaburauchi Ryota, Saito Yuta, Makino Kotaro, Fons Paul, Ueno Keiji, Hase Muneaki	4. 巻 -
2. 論文標題 Photo induced Tellurium segregation in MoTe ₂	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 physica status solidi (RRL) Rapid Research Letters	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/pssr.202100633	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計32件（うち招待講演 4件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 池田幸弘, 上野啓司
2. 発表標題 液体前駆体を用いたALD法による二硫化タングステン薄膜成長 (3)
3. 学会等名 2018年 第79回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 五十嵐玲太, 白井肇, 上野啓司
2. 発表標題 カリウム塩をアシスト剤に用いた単層MoS ₂ 及びWS ₂ の化学気相成長
3. 学会等名 2018年 第79回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 上野啓司
2. 発表標題 カルコゲナイド系層状物質原子膜の作製と素子応用
3. 学会等名 第14回量子ナノ材料セミナー (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 上野啓司
2. 発表標題 二次元層状物質薄膜のヘテロエピタキシャル成長
3. 学会等名 第37回電子材料シンポジウム (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 上野啓司
2. 発表標題 2次元層状物質材料の基礎と薄膜形成法
3. 学会等名 2019年 第66回応用物理学会春季学術講演会（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 池田幸弘, 上野啓司
2. 発表標題 液体前駆体を用いたALD法による二硫化タングステン薄膜成長（4）
3. 学会等名 2019年 第66回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 五十嵐玲太, 白井肇, 上野啓司
2. 発表標題 アルカリ塩をアシスト剤に用いた気相成長単層MoS ₂ 及びWS ₂ のFET応用
3. 学会等名 2019年 第66回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Y. Ikeda and K. Ueno
2. 発表標題 Growth of Crystalline Tungsten Disulfide Thin Films at 350 °C Using Metallorganic and Organic Liquid Precursors
3. 学会等名 The Seventh International Symposium on Organic and Inorganic Electronic Materials and Related Nanotechnologies (EM-NANO 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 森 拓哉, 上野 啓司
2. 発表標題 相MoTe ₂ の大型単結晶合成
3. 学会等名 2019年 第80回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 井上 敬道, 上野 啓司
2. 発表標題 液体前駆体を用いたWS ₂ 薄膜のMBE成長
3. 学会等名 2019年 第80回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Keiji Ueno, Tomohiro Shida, Shuuto Horii
2. 発表標題 Relaxation of Fermi-level Pinning in 2H-MoSe ₂ FET by Inserting 1T-phase Buffer Layers into Source/Drain Contacts
3. 学会等名 The 11th annual Recent Progress in Graphene and Two-dimensional Materials Research Conference (RPGR2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 近野 健人, 木津 たきお, 塚越 一仁, 上野 啓司
2. 発表標題 気相成長法による層状In ₂ Se ₃ 薄膜の形成
3. 学会等名 2020年 第67回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 上野啓司
2. 発表標題 カルコゲナイド系層状物質材料の基礎と薄膜形成法
3. 学会等名 公益社団法人化学工学会 反応工学部会 CVD反応分科会第31回シンポジウム（招待講演）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 謝 天順、大内 秀益、坂梨 昂平、上野 啓司、青木 伸之
2. 発表標題 低バリアの実現に向けた1T'-MoTe ₂ と2H-MoTe ₂ のコンタクト特性の評価
3. 学会等名 2020年 第81回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 謝 天順、池田 駿太郎、坂梨 昂平、上野 啓司、青木 伸之
2. 発表標題 真空中でレーザー照射により得られた1T'-MoTe ₂ と2H-MoTe ₂ のコンタクト特性の評価
3. 学会等名 2021年 第68回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 井上 敬道、上野 啓司
2. 発表標題 液体前駆体を用いてMBE成長したWS ₂ 薄膜の硫黄アニールによる膜質改善
3. 学会等名 2021年 第68回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 森 拓哉、上野 啓司
2. 発表標題 相MoTe ₂ の大型単結晶合成(2)
3. 学会等名 2021年 第68回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 福島 崇史、上野 啓司
2. 発表標題 低温ALD成長したWS ₂ 薄膜の素子応用
3. 学会等名 2021年 第82回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 福田拓未, 牧野孝太郎, 齊藤雄太, Paul Fons, Alexander V. Kolobov, 安藤淳, 森拓哉, 石川良, 上野啓司, Jessica Afalla, 長谷宗明
2. 発表標題 2H-MoTe ₂ の長寿命コヒーレントフォノン周期駆動系における非平衡定常状態
3. 学会等名 日本物理学会 2022年第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 齋藤 修士、上野 啓司
2. 発表標題 結晶性二硫化タングステン薄膜の低温成長
3. 学会等名 2022年 第69回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 山田 真矢、上野 啓司
2. 発表標題 原子層堆積法を用いた結晶性二硫化モリブデンの領域選択成長
3. 学会等名 2022年 第69回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>埼玉大学大学院理工学研究科 上野研究室公式Webページ http://surface-www.chem.saitama-u.ac.jp/wiki/index.php 埼玉大学大学院理工学研究科基礎化学プログラム・理学部基礎化学科 Annual Reports http://www.chem.saitama-u.ac.jp/wiki/index.php?%E6%B4%BB%E5%8B%95%E5%A0%B1%E5%91%8A%E3%83%BB%E4%BA%88%E5%91%8A%2FAnnual%20Reports</p>
--

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	池田 幸弘 (Ikeda Yukihiro)		
研究協力者	井上 敬道 (Inoue Takamichi)		
研究協力者	森 拓哉 (Mori Takuya)		

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	齋藤 修士 (Saito Shuji)		
研究協力者	山田 真矢 (Yamada Shinya)		
研究協力者	志田 知洋 (Shida Tomohiro)		
研究協力者	五十嵐 玲太 (Igarashi Reita)		
研究協力者	堀井 嵩斗 (Horii Shuuto)		
研究協力者	吉田 考希 (Yoshida Koki)		
研究協力者	福島 崇史 (Fukushima Takafumi)		
研究協力者	菊地 冬真 (Kikuchi Toma)		

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
中国	National Chung Hsing University	National Chiao Tung University	National Tsing Hua University	他1機関