

平成 30 年度若手奨励支援予算 成果報告書  
複合原子層構造における光取り出し効率の改善

電気電子通信工学科 星 裕介

## 1. 背景と目的

遷移金属ダイカルコゲナイド(TMD)の中でも  $\text{MX}_2$  ( $\text{M}=\text{Mo}$  or  $\text{W}$ ,  $\text{X}=\text{S}$  or  $\text{Se}$ ) で構成される単原子層物質は、直接遷移型半導体であることや、大きい励起子束縛エネルギーに起因して、室温で励起子発光が起こると知られており、電流注入型発光素子、光検出器、太陽電池といった光電子素子応用の母材として注目されている。特に近年、絶縁体としての性質を持つ六方晶窒化ホウ素(hBN)上に TMD を形成することで、TMD の高品質化が実現できることが報告されており、単原子層 TMD を hBN で封止した複合原子層構造を利用したデバイス開発が期待されている。その一方で、単原子層 TMD の hBN 封止構造に対する基礎光学特性調査に関する報告例は少ない。そこで本研究では、単原子層  $\text{WSe}_2$  (1L- $\text{WSe}_2$ ) を hBN で封止した複合原子層構造において各原子層材料の膜厚が光取り出し効率にどのような影響を与えるか調べた。

## 2. 研究成果の概要

図 1(a)に作製した複合原子層構造の光学顕微鏡像と結晶構造の概略図を示す。表面ステップのある hBN 多層膜を用いることで、Area 1 と Area 2 において Top hBN 膜厚が異なる試料構造を作製した。原子間力顕微鏡を用いて、Area 1 および Area 2 における Top hBN 膜厚を測定したところ、それぞれ 100 nm と 40 nm であることが分かった。図 1(b)と 1(c)は、Area 1 と Area 2 で測定した室温での PL スペクトルを表す。両方の試料において 1L- $\text{WSe}_2$  からの発光ピークが見られており、ピーク形状および、ピーク位置はどちらも大きく変化していない。しかし、ピーク強度は Area 1 と Area 2 で 2 倍程度異なることが分かった。一般的に、PL ピーク強度の違いは 1L- $\text{WSe}_2$  の結晶品質に依存すると考えられるが、本試料構造の場合、Area 1 と Area 2 の 1L- $\text{WSe}_2$  は同一の結晶であり、結晶品質が空間的に揺らいでいるとは考えにくい。したがって、測定領域の違いによる PL 強度変化は、hBN 膜厚の違いにより光学的干渉効果が異なることが影響しているのではないかと考えられる。

次に、多重反射を考慮したフレネル反射の式を利用し 1L- $\text{WSe}_2$  からの PL 強度の計算を行った。図 2(a)に光吸収を計算する場合の光の多重反射経路の概略図を、図 2(b)に光吸収強度の計算結果を示す。光吸収を高める最適な Top hBN 膜厚、Bottom hBN 膜厚が存在しており、これが周期的に変化していることが分かる。図 2(c)に光放出の場合における光の多重反射経路の概略図を、図 2(d)に光放出強度の計算結果を示す。光吸収の場合と同様に、光放出強度を高める最適な hBN 膜厚が存在することが分かる。これらの計算結果を用いて、

$$I_{PL} = \int_0^d |E_{ab}(x) \cdot E_{em}(x)|^2 dx$$

の式から複合原子層構造からの PL 強度を計算した (図 2(e))。  $E_{ab}(x)$  は光吸収強度、  $E_{em}(x)$  は光放出強度を表す。この結果から Top および Bottom hBN 膜厚を変化させると最大で 100 倍程度、PL 強度が変化することが分かった。図 2(f)に Bottom hBN 膜厚を 110nm に固定し、Top hBN 膜厚を変化させた場合の PL 強度の計算結果と、図 1(b)と 1(c)から得られる PL 強度の実験結果を示す。実験結果と計算結果が非常に良く一致しており、図 1(b)と 1(c)における PL 強度の変化は、多重反射による光取り出し効率の変化

が主な原因であることが分かった。

### 3. まとめと今後の展望

光電子素子開発において、発光強度の増大はそのデバイスの性能を特徴づける上で非常に重要になる。複合原子層構造の場合、異なる原子層材料が複数層堆積されていることで試料構造内部での多重反射が支配的になり、光取り出し効率が各原子層膜厚に強く依存することが分かった。したがって、複合原子層構造を利用した光電子素子の高効率化を実現するには、本研究で得られる知見の利用が必要不可欠となる。今後は、光取り出し効率が最適となる複合原子層構造を用いて、電流注入型円偏光発光ダイオードの作製を行う。

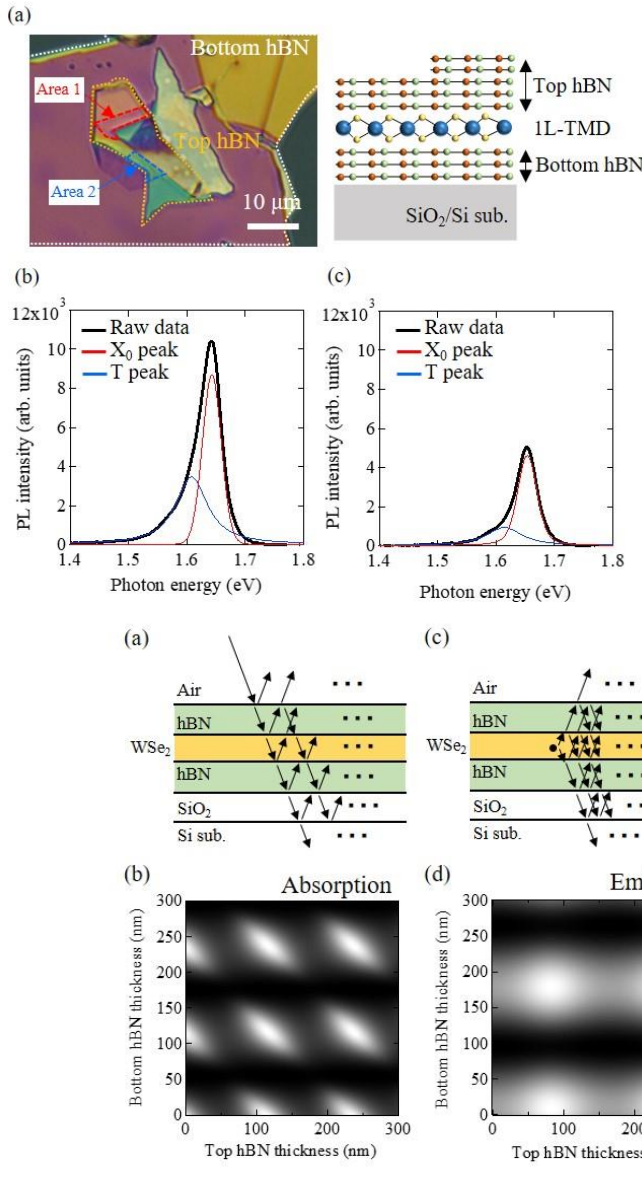


図 1. (a) 作製した複合原子層構造の光学顕微鏡像と、結晶構造の概略図。表面にステップがあるため、Area 1 と Area 2 では Top hBN の膜厚が異なる。(b)(c) Area 1 と Area 2 で測定した室温での PL スペクトル。黒線が実測値で、赤線と青線はそれぞれ、フィッティングにより得られる X<sub>0</sub> ピークと T ピークを表す。

図 2 (a) 励起光が試料構造内に入射された後の光の多重反射経路の概念図。(b) (a)の多重反射経路をもとにフレネル反射の式を用いて計算した光吸収強度の hBN 膜厚依存性。(c) WSe<sub>2</sub> から生じた光の多重反射経路の概念図。(d) (c)の多重反射経路をもとにフレネル反射の式を用いて計算した光放出強度の hBN 膜厚依存性。(e) (b)と(d)をもとにして計算した PL 強度の hBN 膜厚依存性。(f) Bottom hBN 膜厚を 110nm、SiO<sub>2</sub> 膜厚を 100nm として計算した PL 強度の計算結果と実験結果の比較

## 1. 関連する研究成果

### ・学会発表

1. S. Hayashida, K. Watanabe, T. Taniguchi, K. Sawano, and Y. Hoshi: Effect of thermal annealing at a low temperature on exciton dynamics in semiconducting MoTe<sub>2</sub> crystals. 2019 International Conference on Solid State Devices and Materials, Sep. 2019.
2. Y. Hoshi, M. Okada, R. Moriya, S. Masubuchi, K. Watanabe, T. Taniguchi, R. Kitaura, and T. Machida: Dramatic changes of optical properties in a CVD-grown monolayer tungsten disulfide by a pick-and-drop process, 2018 International Conference on Solid State Devices and Materials, Sep. 2018.

### ・解説記事

1. 星、黒田、町田：WS<sub>2</sub>/hBN ファンデルワールス接合の励起子発光特性, 固体物理, 53, p.129, (2018)

## 2. その他のテーマに関連する研究成果

- ・査読付き学術論文：2 件
- ・国際学会発表：2 件