

【助成 40-22】

二次元半導体を利用したマイクロ発光ダイオードへの機能付与

研究者 信州大学 工学部 助教 浦上 法之

〔研究の概要〕

窒化ガリウム系混晶による青色マイクロ発光ダイオード(μ LED)に強い関心が寄せられており、多機能化による応用展開が期待されている。その発光層には $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ 量子井戸構造が採用されているが、In 組成の制御では発光波長の制御に留まる。本研究では、二次元半導体を持つ固有の発光特性(偏光、黄色発光)を青色 μ LED に付与することによる多機能化を目標に、多層膜化することでその実装手法を検討した。単層から赤色発光しその成分が円偏光である二硫化モリブデンや二硫化タングステン、および黄色発光が得られるヒ化ゲルマニウムを発光材料として採用し、六方晶窒化ホウ素と組み合わせた多層膜を発光層として光の導波の観点から構造を設計した。

〔研究経過および成果〕

窒化ガリウム系混晶の微細加工により作製可能なマイクロ発光ダイオード(μ LED)は、安定して高い外部量子効率を得られるだけでなく小型端末への集積化の親和性も高い。これらの発光波長や偏光は用いる半導体材料に由来するため、これらを変えて使用するためには、素子の外部に共振器や波長板などの付与が必要である。他方、層状物質の単分子層(0.7 nm)からなる二次元半導体は、室温を超える励起子結合エネルギーにより、安定した光励起発光が得られる。また速い発光寿命や内因性の円偏光を放出可能なことから、新奇な機能性発光素子への展開が期待できる。また近年では、様々な波長で発光する材料も発見されてきており、その材料選択性も増加している。これらを発光材料とし μ LED を光源としてその構造内に組み込むことができれば、新奇な機能性発光素子への展開が期待できる。しかし、単分子層の MoS_2 や WS_2 は直接遷移型のエネルギーバンド構造を有するが、 μ LED の放射光と比較して実際の発光

強度は極めて小さい。そのため、二次元物質の十分な発光を得るためには、 μ LED の青色放射光を吸収して遮断しながら強い発光を得るための構造設計が必要である。

本研究で用いる二次元半導体は、1) 円偏光(の赤色発光)が得られる二硫化モリブデン(MoS_2)や二硫化タングステン(WS_2)、および 2) 黄色発光が得られるヒ化ゲルマニウム(GeAs)を選定した。また多層膜のもう一つの材料は、絶縁体(Eg: 6 eV)六方晶窒化ホウ素(h-BN)を選定した。これらが繰り返し積層することにより、 MoS_2 (WS_2)または GeAs の単層膜がそれぞれ独立に存在している多重量子井戸構造を作り出すことができる。しかし多層膜は入射光の波長によるが界面での反射が発生するため、 μ LED の青色光を

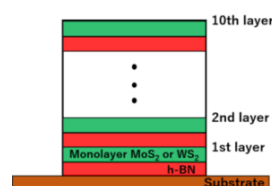


図 1 二次元物質の積層による多層膜の概略図。

透過させて二次元半導体による吸収や発光に寄与させるために、青色光の導波を詳細に検討して多層膜を設計する必要がある。本研究では、二次元物質を繰り返し積層した多層膜を光の導波の観点から設計し、その構造を作製することを目指した。

多層膜構造内の光の導波には有限差分時間領域(FDTD)法に基づく電磁界解析シミュレーションを用い、MoS₂(WS₂)/h-BN 多層膜構造における透過率と反射率に対する照射光の波長依存性を計算した(図2a)。h-BNの膜厚は、20 nmとした。可視光は波長によらず50%以上透過するため、構造内で得られた単層MoS₂およびWS₂の発光(600-700 nm)が取り出せることが分かった。また青色μLEDの発光波長である475 nm程度の光は、MoS₂の場合は80%、WS₂の場合は80%透過することがそれぞれ示された。ただしこれはh-BNの膜厚に依存することも分かっており(図2b)、それを5 nm変化させると、MoS₂の場合は40%程度、WS₂の場合は20%程度、透過率が減少することも分かった。実際に構造を作製する際は、転写工程による手法を採用するため、h-BNの膜厚は経験的に5 nm程度のばらつきがある可能性を考慮すべきである。今後は実際に作製した試料に対するシミュレーション

を実施し、より現実に近い光の導波を解析していく予定である。

GeAs/h-BN多層膜構造に対しても透過率と反射率に対する照射光の波長依存性をシミュレーションした。μLEDの475 nm程度の光は53%透過することが示され、単層GeAsの580 nmの発光は67%透過することも分かった。本構造は、μLEDの青色光とGeAsの黄色光を組み合わせた白色光を得るための設計である。そのため、青色光と黄色光の実際に得られる光強度を参考に、それらを組み合わせた白色光になるための設計指針を今後構築していく予定である。

多層膜構造を採用することにより、二次元物質の発光強度が増加するのかを検証した。剥離と転写の繰り返しにより、MoS₂/h-BN多層膜構造を作製しフォトルミネッセンス(PL)スペクトルを得た。MoS₂の積層数を増加することにより、PL強度は単調に増加した。二次元物質の発光強度を増加するために積層構造を採用することで単層膜の積層数を単純に増加させることができ、その優位性を確認することができた。更なる積層数の増加により、μLEDの実際の青色光の強度を超える多層膜を作製し、MoS₂(WS₂)で取得可能な偏光を付与したμLEDの実現を目指す。またGeAsの黄色発光を放射可能な多層膜の作製により、多機能(光通信や給電など)と白色を実現するμLEDへの展開にも期待できる。

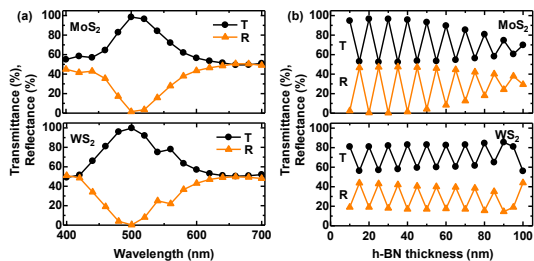


図2 MoS₂(WS₂)/h-BN多層膜構造における透過率と反射率に対する(a)照射光の波長依存性(h-BN: 20 nm)および(b)h-BNの膜厚依存性(波長: 475 nm)

[発表論文]

1. 上篠 雄登, 浦上 法之, 橋本 佳男, “二次元物質の積層による多層膜構造の設計と作製”, 2024年 第71回応用物理学会 春季学術講演会 講演予稿集, 24a-31B-6.