

論文内容の要旨

博士論文題目 ワイドバンドギャップ半導体における励起子および高密度電子正孔多体効果に関する研究

氏名 永井 武彦

緑色から近紫外波長領域にバンドギャップエネルギーを有する半導体は、発光ダイオードやレーザーなどの光デバイス材料として注目されている。また、このようなワイドバンドギャップ半導体は、励起子の束縛エネルギーが大きく光物性の基礎的立場から見ても興味深い物質である。本論文ではワイドバンドギャップ半導体である CdS と GaN に着目し、励起子および高密度電子正孔が関与する光学過程について実験的研究を行った。

本論文は 7 章からなっており、各章の内容は以下の通りである。

第 1 章では、研究背景と本研究の目的について述べた。

第 2 章では、試料の結晶構造並びに基礎物性定数についてまとめた。

第 3 章では、高密度電子正孔系における電子状態のこれまでの理論的解釈と実験結果についてまとめた。

第 4 章では、試料評価と実験に用いた光学装置について述べた。

第 5 章では、新規構造物質である立方晶 CdS 薄膜の励起子遷移エネルギーおよび試料に内包された歪みについて議論した。発光 (PL)、反射 (R)、発光励起 (PLE) に加え変調反射 (PR) スペクトル測定を行うことで励起子遷移エネルギーを正確に求めた。その結果、価電子帯が分裂することで現れる重い正孔 (HH)、軽い正孔 (LH) 励起子による光学遷移を見出した。さらに、PR スペクトルの温度依存性から、この分裂は試料に内包された熱膨張歪みによる効果であることを明らかにした。

第 6 章では、六方晶 GaN 薄膜において励起子状態から高密度電子正孔状態までの発光ダイナミクスと多体効果について議論した。PR スペクトルの測定・解析から弱励起条件下における六方晶 GaN 薄膜の励起子遷移エネルギーを決定した。光カーシャッター法を用いた超高速時間分解 PL スペクトルの測定を行い、発光ダイナミクスを明らかにした。その結果、電子正孔プラズマ (EHP) 発光、励起子-励起子散乱による発光、励起子分子発光と変化する様子を観測した。EHP の相状態は、液滴および液体相にはならずガス状態のまま輻射再結合し励起子モット転移密度以下となる事を明らかにした。また、励起子-励起子散乱による発光は、二つの A 励起子が非弾性散乱し、一つが B バンドまたは C バンドへ散乱される過程もあることを見出した。さらに EHP 発光のスペクトル形状解析より、エネルギーギャップの電子正孔対密度依存性を求め、理論計算との比較から電子と正孔の相関効果の重要性を指摘した。

第 7 章では、本研究で得られた新たな知見についてまとめた。

以上、本研究では、ワイドバンドギャップ半導体である CdS および GaN の基礎光学特性および高密度電子正孔状態の発光ダイナミクスや多体効果を明らかにした。

(論文審査結果の要旨)

近年、ワイドバンドギャップ半導体を用いた発光ダイオードやレーザーなどの光デバイスの研究・開発が盛んに行われている。ワイドバンドギャップ半導体の光学物性を調べることは、短波長光デバイスの設計指針を得る上で非常に重要となる。本論文は、ワイドバンドギャップ半導体である CdS と GaN における励起子および高密度電子正孔多体効果について明らかにすることを目的として、種々の光学的手法を用いて実験的研究を行い、以下のような新しい知見を得た。

1. 立方晶閃亜鉛鉱型結晶構造を有する CdS 薄膜の励起子光学物性を明らかにした。反射 (R)、発光 (PL)、発光励起 (PLE) スペクトル測定に加え、光変調反射 (PR) 分光法を取り入れることにより、バンド端に現れる二つの光学遷移が、重い正孔励起子と軽い正孔励起子であることを見出した。これらのエネルギーが分裂するのは、熱歪みによるものであることも明らかにした。立方晶エピタキシャル薄膜は実用上重要であり、その励起子光学特性を明らかにしたことは、今後の光学素子設計するうえで基礎的かつ不可欠な情報を与えるものである。
2. GaN 薄膜においてフェムト秒パルスレーザーを駆使して高密度電子正孔状態を実現し、カー・ゲート法により超高速時間分解 PL スペクトルを測定し、電子正孔多体効果に関して新しい知見を得た。励起子分子、励起子-励起子散乱、電子正孔プラズマ (EHP) に起因した PL スペクトルの時間変化から、高密度な電子正孔は、EHP 状態を形成し、時間経過とともに密度が減少すると励起子状態になることを見出した。励起子共鳴励起によって有効温度の低い高密度励起子状態を実現するとこれまで観測されていなかった A バンドの励起子から B、C バンドへ散乱されるような新しい励起子-励起子散乱過程が現れることを見出した。時間分解 PL スペクトルの形状解析より、バンドギャップエネルギー、有効温度、キャリア密度を求め、これまでの理論的な研究結果と比較・検討し、励起子束縛エネルギーが大きい半導体では、高密度電子正孔状態においても電子と正孔間の相関効果を取り入れる必要があることを指摘した。レーザー発振するような高密度電子正孔状態を明らかにした本研究は、基礎物性物理の興味からも応用上の必要性からも非常に価値のある成果である。

以上のように、本論文は、ワイドバンドギャップ半導体の励起子および高密度電子正孔多体効果に関する光学的研究を行い、学術上の貢献をしているばかりでなく、応用上も重要な物性を明らかにし、価値の高いものである。よって、審査委員一同は、本論文が博士(工学)の学位論文として価値あるものと認めた。