

氏名	古川 喜彬	
学位の種類	博士 (工学)	
学位記番号	第 6370 号	
授与報告番号	(甲)第 3617 号	
学位授与年月日	平成 29 年 3 月 21 日	
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 1 項該当者	
学位論文名	GaAs/AlAs 多重量子井戸構造における励起子—励起子散乱とタイプ II 超格子における電子・正孔液滴の発光特性に関する研究	
論文審査委員	主査 中山 正昭	副主査 金 大貴
	副主査 重川 直輝	

論文内容の要旨

励起子—励起子散乱は、励起子 2 体による非弾性散乱現象として知られている。この散乱の終状態は、光子と励起子の混成状態 (励起子ポラリトン) で光子成分が主体的な光子性ポラリトンとして理論的にモデル化されている。GaAs/AlAs 多重量子井戸構造では、量子閉じ込め効果により GaAs 層中の励起子が安定化するため、励起子—励起子散乱が発現する。また、光励起された励起子は、励起強度が増加すると励起子間のクーロン遮蔽効果が顕著となり、電子・正孔プラズマへ転移する。この電子・正孔プラズマ (気相) の有効温度が十分に冷却されると、凝縮状態である電子・正孔液滴 (液相) が形成される。GaAs/AlAs タイプ II 超格子では、電子が AlAs 層 X サブバンド、正孔が GaAs 層 Γ サブバンドに存在し、実空間と運動量空間において分離される。このため、長いキャリア寿命を有し、キャリアの冷却効率に優れている。本論文は、GaAs/AlAs 多重量子井戸構造における励起子—励起子散乱発光のポラリトン特性、ならびに、GaAs/AlAs タイプ II 超格子における電子・正孔液滴の定常発光特性と形成ダイナミクスについて研究した成果をまとめたものである。

第 1 章では、本研究の背景、目的、及び、本論文の構成について述べた。

第 2 章では、GaAs (d nm)/AlAs (d nm) 多重量子井戸構造 ($d=10, 15, 20$) を試料として、励起子—励起子散乱発光のポラリトン特性について述べた。励起子—励起子散乱の発光ダイナミクスを系統的に測定し、得られた発光減衰プロファイルの形状解析を行い、発光速度のエネルギー依存性が、励起子ポラリトンの群速度のエネルギー依存性でスケールリングできることを明らかにした。さらに、空間分解発光イメージの測定から、励起子—励起子散乱発光が、励起スポットから空間的に離れた発光スポット (試料端面) で観測されることを見出した。すなわち、励起スポットで生じた励起子—励起子散乱により発生したポラリトンが、試料面内を空間伝播し試料端面で光子へ変換されていることを解明した。

第 3 章では、GaAs (3.4 nm)/AlAs (3.4 nm) タイプ II 超格子を試料として、電子・正孔液滴の定常発光特性について述べた。定常発光スペクトルの励起強度依存性の測定から、閾値性を有する電子・正孔液滴発光が出現することを見出した。発光スペクトルの形状解析から、電子・正孔液滴の励起子系 (励起子と励起子分子) に対する安定化エネルギーを定量化し、その値が有効温度に相当する熱エネルギーより十分に大きい、つまり、電子・正孔液滴が安定であることを明らかにした。

第 4 章では、GaAs (3.4 nm)/AlAs (3.4 nm) タイプ II 超格子を試料として、電子・正孔液滴の形成ダイナミクスについて述べた。発光ダイナミクスの系統的な測定から、励起直後に電子・正孔プラズマ (気相) が形成され、時間経過に伴って有効温度が低下して励起子と励起子分子を伴った電子・正孔液滴発光が観測されることを見出した。時間分解発光スペクトルの形状解析から、約 14ns 以降、キャリアと励起子系の有効温度が一致し、励起子系と準熱平衡状態に達した電子・正孔液滴が形成されることを明らかにした。

最後に、第 5 章では、本研究で得られた成果を総括して結論とした。

論文審査の結果の要旨

多重量子井戸構造・超格子は、ナノメートルスケールの半導体超薄膜のヘテロ接合周期構造であり、電子・正孔波動関数に対する量子効果によって新規な物性と機能が発現するために、物性物理とデバイス応用の両面において注目を集めている。本研究では、半導体における高密度励起現象である励起子-励起子散乱と電子・正孔液滴に着目している。GaAs/AlAs 多重量子井戸構造の場合、量子閉じ込め効果によって励起子が安定化し、励起子-励起子散乱が発現するが、発光のポラリトン特性については未解明であった。また、GaAs/AlAs タイプ II 超格子の場合、電子と正孔の最低エネルギー量子化状態がそれぞれ AlAs 層の X 点サブバンドと GaAs 層の Γ 点サブバンドに空間分離されて遷移確率が低下し、マイクロ秒オーダーの長いキャリア寿命となる。そのために、キャリア冷却効果に優れ、電子・正孔液滴の形成が期待されてきたが実証されていなかった。本論文では、GaAs/AlAs 多重量子井戸構造における励起子-励起子散乱発光のポラリトン特性、ならびに、GaAs/AlAs タイプ II 超格子における電子・正孔液滴の定常発光特性と形成ダイナミクスに関する研究成果がまとめられている。

まず、GaAs (d nm)/AlAs (d nm) 多重量子井戸構造 ($d=10, 15, 20$) を試料として、励起子-励起子散乱の発光ダイナミクスを系統的に測定し、発光減衰プロファイルの多重指数関数形状解析を行い、発光速度のエネルギー依存性が、散乱の終状態である光子性ポラリトンの群速度のエネルギー依存性でスケールリングできることを明らかにしている。さらに、空間分解発光イメージの励起強度依存性の測定から、励起子-励起子散乱発光が、励起スポットから空間的に離れた発光スポット（試料端面）で観測されることを見出し、励起スポットにおいて励起子-励起子散乱により生成されたポラリトンが、試料面内を空間伝播し試料端面で光子へ変換されていると結論している。

次に、GaAs (3.4 nm)/AlAs (3.4 nm) タイプ II 超格子を試料として、定常発光スペクトルの励起強度依存性の測定から、閾値特性を示して電子・正孔液滴発光が出現することを見出している。さらに、キャリア多体効果を反映する再構成バンドギャップエネルギーを考慮したフェルミ分布関数に基づく発光スペクトル解析を行い、電子・正孔液滴の安定化エネルギーを定量化し、その値がキャリア有効温度に相当する熱エネルギーよりも十分に大きいこと、すなわち、電子・正孔液滴の熱力学的安定性を明らかにしている。

最後に、GaAs (3.4 nm)/AlAs (3.4 nm) タイプ II 超格子を試料として、時間分解発光スペクトルの測定から、励起直後に気相の電子・正孔プラズマが生成され、時間経過に伴って有効温度が低下し、励起子系と共存する電子・正孔液滴に転移することを見出している。さらに、時間分解発光スペクトルの形状解析から、10ns 程度の時間経過後、キャリアと励起子系の有効温度が一致し、励起子系と電子・正孔液滴が準熱平衡状態に達することを明らかにしている。

以上を総合して、本論文は、GaAs/AlAs 多重量子井戸構造とタイプ II 超格子における高密度励起現象の光学応答に関して斬新かつ重要な知見を提示しており、光物性工学分野と光機能性材料分野の発展に寄与するところが大きい。よって、本論文の著者は、博士（工学）の学位を受ける資格を有するものと認める。