

審査の結果の要旨

氏 名 松尾 康弘

本論文は、「Crossover from Exciton Polariton Condensation to Photon Lasing (励起子ポラリトン凝縮からレーザー発振へのクロスオーバー)」と題し、英文7章から構成されている。半導体量子井戸マイクロキャビティにおいて、低密度励起下で現われる励起子ポラリトン凝縮体から高密度励起下で現われる光子レーザーへのクロスオーバー特性が論じられている。特に、発光スペクトル、空間コヒーレンス、偏光(スピン)特性の時間分解、空間分解測定により、クロスオーバーの存在が実験的に確定されたことが報告されている。

第1章は、「Introduction (序章)」であり、半導体多重量子井戸を埋め込んだマイクロキャビティにおいて低温で実現される、いわゆる励起子ポラリトンレーザーと呼ばれるコヒーレント光源では、2つのしきい値が存在することが述べられている。低密度励起側のしきい値は、励起子ポラリトンのボーズアインシュタイン凝縮(正しくはBerezinskii-Kosterlitz-Thouless(BKT)相転移)の臨界点であることが分っている。一方、高密度励起側のしきい値は、その正体がこれまで十分に解明されていなかった。これを解明するという本研究のテーマの意義と博士論文の構成が述べられている。

第2章は、「Quantum Condensation and Spatial Coherence (量子凝縮と空間コヒーレンス)」と題し、本研究の背景となる概念がまとめられている。まず、古典粒子、ボーズ粒子、フェルミ粒子の違い、熱平衡条件下での分布関数(ボルツマン分布、ボーズアインシュタイン分布、フェルミディラック分布)が導出されている。次に、3次元のボーズ(粒子)理想気体における量子凝縮の臨界点、長距離相関(空間コヒーレンス)が議論されている。次に、弱い相互作用を持つ3次元ボーズ気体のボゴリウボフ理論が展開されている。量子凝縮に伴うボゴリウボフ励起スペクトル(広義の南部・ゴールドストーンモード)と音速が導出されている。次に、2次元ボーズ(粒子)理想気体では量子凝縮は起らないこと、すなわち空間コヒーレンス関数 $g^{(1)}(r)$ は低密度領域ではガウス関数で減衰し、高密度領域では指数関数で減衰することが示されている。一方、弱い相互作用を持つ2次元ボーズ(粒子)気体では、 $g^{(1)}(r)$ は緩やかなべき乗減衰を示し、長距離相関を一部回復させることが示されている。これが、本研究の中心概念であ

るBKT相である。更に、レーザーの $g^{(1)}(\mathbf{r})$ が導出され、単一モード発振下では、完全な長距離相関 ($g^{(1)}(\mathbf{r}) = 1$) が実現されることが述べられている。

第3章は、「Microcavity Exciton Polaritons (マイクロキャビティ励起子ポラリトン)」と題し、本研究の対象である励起子ポラリトンの基礎がまとめられている。まず、励起子を導入するため、バンド構造 (有効質量)、ワニア励起子スペクトル、励起子と光子の双極子相互作用、遷移の選択則、量子井戸励起子のLuttinger-Kohn ハミルトニアン理論などが記述されている。次に、マイクロキャビティを導入するため、ファブリ・ペロー共振器、分布ブラッグミラー、プレーナキャビティ光子の質量、などが記述されている。更には、量子井戸励起子とマイクロキャビティ光子の強結合がつくる励起子ポラリトンが定式化され、重要な励起子ポラリトン分散 (エネルギー対運動量) が求められている。最後に、励起子のLT分裂による、有効磁場の出現による光スピンホール効果の存在が記述されている。

第4章は、「Experimental Setup (実験装置)」であり、本研究で実施された3つの実験に使われた実験系が詳述されている。まず、ポンプ光源とポンピングに使われた光学配置、高エネルギー/高運動量の励起子ポラリトン共鳴励起が述べられている。次に、フーリエ光学を用いた空間分布 (ニアフィールド) と運動量分布 (ファーフィールド) の測定系が紹介されている。次に、ストリークカメラを用いた時間分解測定の手法が記述されている。最後に、偏光板を用いた偏光 (スピン) 特性の評価とマイケルソン干渉計を用いた空間コヒーレンス関数 $g^{(1)}(\mathbf{r})$ の評価手法が説明されている。

第5章は、「Crossover from Polariton Condensation to Photon Lasing (ポラリトン凝縮体から光子レーザーへのクロスオーバー)」と題し、本研究における第1の実験結果 (発光スペクトル特性) が記述されている。まず、ポラリトン発光強度対ポンプ光強度の測定結果から、2つのしきい値の存在が示されている。次に、発光スペクトルの時間応答の測定結果から、第2のしきい値の下側 (低密度側) では励起子ポラリトン凝縮体が支配的であり、上側 (高密度側) では光子レーザーが支配的であることが結論づけられている。最後に、発光スペクトルの偏光依存性の実空間、運動量空間分布の測定結果から、光スピンホール効果の関与が示唆されることが述べられている。第2のしきい値の上側では、励起スポットの中心部で光子レーザーが、周辺部では励起子ポラリトン凝縮体が同時に存在するハイブリッド系になっていることが示唆された。

第6章は「Spatial Coherence (空間コヒーレンス)」と題し、本研究における第3の実験である空間コヒーレンス $g^{(1)}(\mathbf{r})$ の測定結果が記述されている。第1のしきい値の下

側（低密度側）では、 $g^{(1)}(r)$ はガウス関数で減衰し、第1しきい値と第2しきい値の間のポンプレートでは、ガウス関数減衰とべき乗減衰が同居し、第2のしきい値の上側（高密度側）では距離 r に依存しない $g^{(1)}(r)$ が観測された。この結果は、第2のしきい値の下側は励起子ポラリトンのBKT相、上側は光子レーザーが支配的であるという第5章の結論をサポートするものである。

第7章は「Conclusion（結論）」であり、本研究の全体をまとめている。本研究の貢献は、これまで解明が進んでいなかった半導体マイクロキャビティ中の励起子ポラリトンBKT相から光子レーザーへのクロスオーバー特性を、3つの実験結果（発光スペクトル、実空間/運動量空間分布のダイナミクス、空間コヒーレンス測定）から明らかにしたことである。

以上これを要するに、本論文は低消費電力コヒーレント光源として期待されているポラリトンレーザーの高密度励起下の異常なふるまい（第2のしきい値）が、ポラリトン量子凝縮相（BKT相）から光子レーザーへのクロスオーバーであることを、初めて実験により明らかにし、ポラリトンレーザーの動作機構を解明したという点で、電子情報学上貢献するところが少なくない。

よって本論文は博士（情報理工学）の学位請求論文として合格と認められる。