

審査の結果の要旨

氏 名 梶本 尚之

本論文は、「カゴメ格子上の微小共振器内エキシトン・ポラリトン (Microcavity Exciton-Polaritons in a Kagome Lattice)」と題し、和文7章から構成されている。2次元カゴメ格子はその幾何学的特性(フラストレーション)から興味深い物性を示すことが理論的に予測されている。例えば、Hubbard modelの基底状態が強磁性を示し、XYモデルにおいては量子スピン液体を示すことなどが知られている。これらの新奇な物性の根底にある物理は、フラットバンドと呼ばれる運動量に依存しないエネルギーバンドが存在し、このバンド上の粒子が量子干渉により局在することであると予測されている。このカゴメ格子の物性を解明するため人工的なカゴメ格子構造を作製する様々な試みが、原子の光格子やフォトニック結晶や半導体ナノ構造などを用いて行なわれてきたが、フラットバンドの存在を確認するには至っていない。本研究では、従来用いられてきたタイトバインディングモデルよりも精度の高い平面波モデルを用いてバンド計算を行ない、実験系を定量的に記述できる理論を構築した。更にGaAsプレーナマイクロキャビティー中の励起子ポラリトンに対し、金属膜を用いて人工カゴメ格子を形成し、その凝縮体がフラットバンドを示すことをフォトルミネッセンスの測定から確認することに初めて成功した。

第1章は「はじめに」であり、本論文で扱う基本概念と論文の構成を簡単にまとめている。特に、対象(カゴメ格子)、物理系(微小共振器内エキシトン・ポラリトン)、理論(バンド構造計算)、実験(フォトルミネッセンス)の4つの要素が説明されている。

第2章は「エキシトン・ポラリトン」であり、量子井戸エキシトン、微小共振器エキシトン・ポラリトン、エキシトン・ポラリトンのボーズアインシュタイン凝縮の物理が5.9の式を通して定式化されている。

第3章は「カゴメ格子」であり、nearest neighbor tight binding法を用いてカゴメ格子のバンド構造が計算されている。第3バンドがフラットバンドとなることが示され、その起源が論じられている。更に、この第3バンド上の粒子は、空間的に局在した状態を示し、その起源が粒子間の相互作用ではなく量子干渉であることが指摘されている。

第4章は「測定装置とサンプル作製」である。まず、ニアフィールドとファーフィー

ルド面上でのフォトルミネッセンスの分光実験系が示されている。次いで、金属膜を付けたプレーナマイクロキャビティのtransfer matrix法を用いた共鳴エネルギー計算がなされ、エキシトン・ポラリトンに対し $\sim 200 \mu\text{eV}$ 程度の閉じ込めポテンシャルを形成できることが述べられている。また、実験に使用したプレーナマイクロキャビティのエネルギーと運動量間の分散関係とデチューニング特性が示され、最後に電子ビーム露光技術を用いた金属膜のカゴメ格子状のパターン作製の手法と結果が示されている。

第5章は「理論計算」であり、本研究で使用するような弱いポテンシャル障壁を有するカゴメ格子のバンド構造が計算されている。tight binding法に比べて、より精度が高い平面波展開法を用いて、第3章で示した計算結果と定性的に一致した結果を得ている。すなわち、格子間隔を広げていくにつれて、第3バンドが次第にフラットになっていく。更に、 Γ 点、M点、K点での粒子数分布と位相分布が計算され、第3バンドでの粒子の局在化の様子が確認されている。

第6章は「実験結果」であり、デチューニングパラメーターの測定、エネルギーと運動量の分散関係の測定、エネルギー対空間位置関係の測定の3つの主要な結果を示している。予測した第3バンドの平坦化とその状態へのエキシトン・ポラリトンの凝縮が確認された。また、粒子のトラップへの局在化の傾向も実験的に確認された。

第7章は「結論」であり、得られた理論結果と実験結果がまとめられ、今後の課題が論じられている。

以上、これを要するに、本論文は2次元カゴメ格子上のエキシトン・ポラリトン凝縮相がエネルギー対運動量のフラットバンド化とトラップポテンシャルへの局在を示すことを初めて実証したという点で、量子シミュレーションの一つの成功例を示したこととなり、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。