

審査結果の要旨

論文提出者氏名 青木 隆朗

多量の情報を高速に処理する次世代情報技術にとって光によって光信号を直接制御する非線形光学素子は必須のものである。成熟した半導体エレクトロニクス技術との効果的な結合を考えると半導体の非線形光学応答の利用はきわめて重要である。高速応答と低パワー動作を両立させるためには、バンド端近傍の光学遷移の共鳴効果を利用する必要がある。これまでバンド端近傍の非線形光学現象については、バルク半導体だけでなく、量子井戸や量子ドットについても多くの研究が行われている。しかし、その性能を支配する物理機構は電子正孔間のクーロン相互作用に起因する多体効果に直接関わることから、統一的な理解が得られていない難問である。本研究は半導体のバンド端近傍の非線形光学応答について、各種の半導体において、電子正孔系の多体相互作用に起因する効果を抽出するための実験法を考案し、非線形光学応答を支配する要因の解明を試みたものである。その結果励起子共鳴近傍の非線形光学応答は励起子間の2体の相互作用として扱うことで系統的に整理できることが見いだされた。これは2対の電子、正孔の4体の相関をコンポジットボソンである励起子状態を出発点とすることにより、2体の相互作用として明解に扱えることを示したものである。

本論文は9章からなる。以下に各章の内容を要約する。

第1章は、半導体励起子系の非線形光学応答の研究についてのこれまでの研究の背景が述べられ、それをもとに本研究の目的を示し、さらに本論文の構成について述べられている。

第2章は、励起子系の非線形光学応答の理論的な背景を述べ、本研究で行う理論解析の土台となる「弱く相互作用するボゾンモデル(WIBM)」について解説している。その上で、本研究で行う実験の着眼点と、それに対応するWIBMの拡張について理論的説明がなされている。

第3章では、本実験で行った四光波混合測定の実験法、および本研究で用いた試料であるGaN、ZnSe、GaAs微小共振器について述べられている。

第4章では、GaNおよびZnSeにおける励起子量子ビートの実験について述べられている。まず、WIBMに基づいて励起子量子ビートの起源とビートの位相情報の意味について明らかにしている。特にホールの軌道が異なる異種励起子間の相互作用について考察がなされている。この理論的考察に基づき実験結果が解析され、励起子間相互作用は電子のスピンのみ依存し、正孔のスピンには依

存しないことが示された。これは成功の有効質量を無限大とする近似を裏付けるものである。

第 5 章では、励起子間相互作用係数における動的効果について、GaN の励起子共鳴、および励起子分子二光子共鳴におけるピコ秒を光源とする四光波混合信号実験を通じて議論している。WIBM に基づき信号がピークとなるパルス遅延時刻の表式を求め、電子・正孔の 4 体の相関の動的な効果を反映していることが示された。これと実験結果との比較により位相空間充填効果と励起子分子の効果の相対的な寄与が決定された。

第 6 章では、微小共振器に埋め込まれた GaAs 量子井戸励起子の四光波混合信号スペクトルについて解析が行われ、周波数軸上の測定に表れる、励起子間相互作用の動的な効果について検討が行われた。その結果、2 個の励起子が束縛状態を形成する励起子分子については動的な扱いが必須であるが、その他の相互作用については動的効果を見捨て瞬時的なものとして扱う近似が妥当であることが示された。

第 7 章では、GaAs 励起子-微小共振器結合系の 2 つの共振器ポラリトン分枝間の量子ビートを測定し、不均一広がりの影響と励起子分子の寄与を調べられた。その結果、逆スピン励起子間の瞬時的な相互作用と束縛準位である励起子分子の効果の寄与の相対値を決定することができた。

第 8 章では、本研究で得られた結果を踏まえ、励起子系の非線形光学応答に関する理論について WIBM との比較から検討が行われた。その結果、励起子共鳴近傍の非線形光学応答は、広く用いられてきた平均場近似が成り立たないこと、励起子分子の寄与が重要であることが明らかになった。WIBM は励起子を出発点とするモデルであり、系の非線形光学応答を記述する分極の結合運動方程式を自然な形で導出できるものである。また動的効果すなわち励起子間相互作用におけるメモリー関数についてもより微視的な理論と整合することが示された。

第 9 章では、本論文のまとめと今後の展望が述べられている。

以上のように、本研究で著者は、これまで不均一系の位相緩和時間測定法として広く用いられてきた 2 パルス四光波混合を、半導体の励起子系に適用し、時間周波数両軸での振る舞いやその偏光依存性に注目することで、バンド端近傍の非線形光学応答の起源について定量的に評価する測定手法となることを提案し、典型的な半導体である GaN、ZnSe、GaAs 微小共振器について実験を行いこれを実証した。特に重要な効果が励起子間の 2 体の相互作用として扱えるという WIBM の妥当性を示した。これは高効率高帯域の非線形素子設計の指導原理を与えるものとなると期待され、物理工学の発展への本研究の寄与は大きい。よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。