

## 自己評価報告書

平成 23 年 4 月 21 日現在

機関番号：14401

研究種目：新学術領域研究

研究期間：2008～2012

課題番号：20104008

研究課題名（和文） 半導体レーザーの動的電子相関理論

研究課題名（英文） Dynamically-correlated electron theory of semiconductor lasers

研究代表者

小川 哲生 (OGAWA TETSUO)

大阪大学・大学院理学研究科・教授

研究者番号：50211123

研究分野：物性理論，量子光学

科研費の分科・細目：物理学・物性 I・物性 II

キーワード：半導体レーザー，光物理学，動的電子相関，コヒーレンス，量子凝縮

## 1. 研究計画の概要

半導体中の電子励起多体状態と光子場との結合系を対象とし、動的電子相関効果を取り入れた量子光学応答理論を構築する。それをレーザー発振や自然放出過程に適用することによって、従来の現象論や自由電子近似に代わる新しい半導体レーザー理論体系を整備する。同時に、非平衡定常状態での多粒子系の量子応答理論の定式化と深化に寄与し、電子-正孔-フォノン系と電子-正孔-フォノン-光子系での量子コヒーレンス形成の類似と相違を明らかにし、動的電子相関を用いて物質コヒーレンスと光コヒーレンスを制御・設計するための指導原理を確立する。

そのために、(1) 準静的性質: 準熱平衡状態にある電子正孔系での動的電子相関効果を微視的に考究して、反転分布状態の量子・熱揺らぎ特性や光学利得発生および自然放出機構を明らかにし、(2) 動的性質: 光励起法および電流注入法によって生成される非平衡定常状態にある反転分布とそこでの量子多体相関と量子凝縮の形成・崩壊ダイナミクスを追跡し、(3) 光の性質: 反転分布と混成した共振器光子場および外部出力光子場の量子コヒーレンスと揺らぎ・雑音特性を解明する、という 3 項目の研究目標を定める。これらを統合して、反転分布状態の動的電子相関効果を取り入れ、励起子モット転移～励起子量子凝縮～ポラリトン量子凝縮～レーザー発振を統一的に記述しようとする一電子近似を超えた量子光学応答理論を、実験結果と照らし合わせながら構築する。

## 2. 研究の進捗状況

(1) Huai 教授(上海応用物理研究所)との共同研究を進め、クーロン相関を半導体マクスウェル・ブロッホ方程式法により取り入れた半

導体レーザーの非平衡定常理論を、半古典近似のもとで博士研究員とともにほぼ完成させた。A02 班の秋山研究室(東京大学)での実験結果との比較を行い、理論の改良を進めている。

- (2) (1)の半古典レーザー理論をダイナミクスにも適用し、利得スイッチ系でのチャープ超短パルス発生の機構を解明しつつある。横山研究室(東北大学)での実験結果との比較を行っている。
- (3) 電子正孔系が共振器中の光子場と結合した励起子ポラリトン系で、高密度励起下での「光の量子凝縮」と呼ぶべき状況が生じることを発見し、その状態でのポラリトン内部自由度(電子正孔相関)の特徴を明らかにした。
- (4) バンド縮退度が大きな半導体では、励起状態で電子正孔液滴が生じる。その表面張力、液滴サイズや粒子密度の動径分布関数を計算しようとする理論を、経路積分法と電子ガス理論を援用して構築した。A01 班の五神研究室(東京大学)での実験結果との比較を進める。
- (5) 半導体レーザーの発振閾値以下では、協同的自然放出過程が重要である。そこで、超蛍光と増幅自然放出との違いを明らかにするため、コヒーレンス形成時間を評価する理論計算を進めた。さらに、電場の空間伝搬効果および原子密度の空間不均一性を取り入れた大規模計算を進めている。
- (6) 二準位系を含む微小共振器アレイは、ボーズハバード模型との類推から、「モット相」に相当する光子数状態と、「超流動相」に相当する準コヒーレント状態との相転移がある。この相転移に関して、有限温度での厳密計算を行い、光子統計などの量子コヒーレンス

を解明し、その制御可能性を議論した。

- (7) レーザーは、相互作用する複数のサブシステムが熱浴に接している「量子複合散逸系」の一例である。この系での量子緩和を再考察し、ボルン-マルコフ近似が破綻することを示した。量子マスター方程式は、非マルコフ近似レベルで用いなければならない。

### 3. 現在までの達成度

②おおむね順調に進展している。

(理由)

半導体レーザーの動的相関理論構築に向けて、様々な側面からの研究を多角的に進め、それらを総合することによって完成に到達する。なので、最初の3年間は、それぞれのテーマをある程度独立に進めることによって、半導体レーザーの重要ないくつかの側面を深く掘り下げてきた。国際会議や学会での講演発表は極めて順調。論文執筆もおおむね順調である。

物質系側では、コヒーレンス制御のために不可欠な動的電子相関効果(キャリア間相互作用)と散逸過程とを取り上げ、量子凝縮やクロスオーバーなどの相転移側面を解明することで、動的電子相関効果が、それらの物質系の光学応答や発光過程に与える影響を調べている。他方、光子場側では、その量子コヒーレンス制御の一手法としてフォトニック結晶を念頭に置いた微小共振器アレイ構造を研究し、物質系だけでなく光子場系での相転移の概念を確立した。一つ一つの研究は順調に進んでいる。

### 4. 今後の研究の推進方策

大きな目標に向かっての残り2年間は、それぞれの各論的テーマを推進すると同時に、これらを総合し、半導体レーザーの動的相関理論全体の構築に向かう努力が必要である。それは実験家との協力体制無しでは無理であろう。構築すべき理論にもいくつかの「レベル」を想定しており、実験家にとって使いやすい実用理論から、半古典理論レベルで有用な理論、量子コヒーレンスまでも取り扱うことのできる微視的量子理論などをそれぞれ構築する。

各論を深く掘り進める努力と、それぞれの知見をまとめて総合し半導体レーザーの新理論構築に向かう努力と、これらを並行して行う予定である。半古典論を超えた全量子力学的理論構築も、平成23年度から開始する。

なお、このような研究推進に際して、平成23年度から採用された新たな公募研究との協働を重視している。

### 5. 代表的な研究成果

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計9件)

1. K. Kamide and T. Ogawa: “Ground state

properties of microcavity polariton condensates for arbitrary excitation density”, *Phys. Rev. B* (2011) 巻・頁は未定(印刷中). 査読有り

2. K. Kamide and T. Ogawa: “Semiclassical theory for a nonequilibrium steady state in microcavity semiconductor lasers”, *phys. stat. sol. (c)* **8**, 1250-1253 (2011). 査読有り
3. K. Kamide and T. Ogawa: “What determines the wave function of electron-hole pairs in polariton condensates?”, *Phys. Rev. Lett.* **105**, 056401/1-4 (2010). 査読有り

[学会発表] (計42件)

1. T. Ogawa: “Photoinduced phase transitions: “DYCE” optical physics”, The 4th Yamada Symposium on Advanced Photons and Science Evolution 2010 (APSE 2010), JICA Osaka, 14-18 June 2010. (invited)
2. 小川哲生: “電荷不均衡電子正孔系の光物理”, 日本物理学会第65回年次大会 領域5・領域4・領域8合同シンポジウム『半導体のキャリアドーピングと光』, 岡山大学津島キャンパス, 2010年3月21日. (invited)
3. T. Ogawa: “Quantum cooperative phenomena in photoexcited insulators: Exciton Mott transition and electron-hole pair condensation”, *Statistical Physics: Modern Trends and Applications*, Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine, 23-25 June 2009. (invited)

[図書] (計1件)

1. 「光科学研究の最前線2」編集委員会編集 (主な著者: 霜田光一, 井元信之, 荒川泰彦, 以下省略, 著者総数 230 名, 掲載されている順番: 131 番目): 「光科学研究の最前線2」(強光子場科学研究懇談会, 東京, 2009), 総ページ数: 258 ページ

[その他]

ホームページ

<http://www.dyce-opt.org/>