

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 6 月 3 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） Dynamical correlation 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

研究成果の概要（和文）：半導体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非平衡光学応答理論を構築した。それをレーザー発振や発光過程に適用して、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や発光理論体系を整備した。特に、共振器ポラリトン凝縮と半導体レーザーの類似と相違が理論的に明らかになり、非平衡量子凝縮の基礎学術にも新しい知見をもたらした。微小共振器列を用いた光の量子状態の制御法に関する理論的な予測を行い、量子光学素子への応用につながる研究も進展した。

研究成果の概要（英文）：We have interested in coupled systems between photon fields and electron fields in excited states of semiconductors to construct nonequilibrium optical response theories taking into account the dynamically correlation among excited electrons. We have applied such theories to lasing processes and spontaneous emission processes to understand comprehensively semiconductor lasers. In particular, crossover between cavity-polariton condensates and lasing is successfully clarified, which is a typical phenomenon of the “equilibrium-nonequilibrium crossover,” a long-standing issue in statistical physics. Phase transition of photon states in a coupled cavity array is also studied stressing its potential to applications.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	2,700,000	810,000	3,510,000
2009年度	9,300,000	2,790,000	12,090,000
2010年度	8,000,000	2,400,000	10,400,000
2011年度	10,300,000	3,090,000	13,390,000
2012年度	9,300,000	2,790,000	12,090,000
総計	39,600,000	11,880,000	51,480,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・物性 I

キーワード：半導体レーザー，光物理学，動的電子相関，量子光学，相転移

1. 研究開始当初の背景

半導体中の電子励起多体状態と光子場との結合系は、基礎学術の観点からも工学応用の観点からも、長年の興味の対象である。しかし、従来の理論的枠組みは、電子間相互作用

用を無視した自由電子近似理論か、ハートリーフォック近似での半導体ブロッホ方程式理論・半導体ルミネッセンス方程式理論か、ある特殊な系のみ適用できる有効理論のみであった。結合系の微細化とともに、電子

間相互作用と光の量子性の重要度が増したため、これらを取り入れることのできる新たな理論的枠組みが必要となっている。そこで、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し、新しい半導体レーザー理論体系を整備すると同時に、非平衡定常状態の量子応答理論の定式化と深化が喫緊の課題となった。

2. 研究の目的

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相転移理論と非平衡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、(A) 準静的性質：準熱平衡状態にある反転分布（準平衡電子正孔系）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機構を明らかにし、(B) 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・崩壊のダイナミクスを追跡し、(C) 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うるような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。

3. 研究の方法

博士研究員とともに、遮蔽ハートリーフォック近似理論、半導体ルミネッセンス方程式理論、量子ボルツマン方程式理論、量子マスター方程式理論などの適用可能範囲を精査し、これらの長所と短所を明確にした。それを基礎として、(擬)平衡状態の量子多体系を記述しうる理論と非平衡定常状態を記述しうる理論を融合し、二つの極限において、平衡状態と非平衡状態を再現するクロスオーバー理論を構築する。これを様々な系に適用して数値計算を進めることによって、研究の目標達成に向かった。

4. 研究成果

共振器ポラリトンの物理を理解する第一歩として、一定の割合で発生する共振器損失の効果は簡単のため無視し、一定数の励起密度のポラリトン系の基底状態を決定した。共振器ポラリトンは低密度の極限ではボース粒子として振舞うが、有限密度では励起子成分である電子と正孔のフェルミ粒子としての性質が現れる。実験で観測されている高密度におけるポラリトン凝縮の基底状態の理解を進めるために、低密度極限で正しい既存の理論を任意の密度に拡張した。基底状態を電子と正孔の基底で構成することで励起密度の制限の問題を解決し、1980年代に（共振器の無い）多励起子系を対象として開発したBEC-BCSクロスオーバー理論を光子の自由度を含む形に拡張し、基底状態を決定し相図を得た。光が存在しない励起子だけの系では電子・正孔対の結合は実効的に弱まり束縛エネルギーが減少することが知られているが、それとは逆で、光を含む共振器ポラリトン系では密度が高くなるほど（高密度のBCS領域）、電子正孔間の結合が強固になることが明らかになった。これは、高密度側で凝縮した光子が媒介となることで、高密度励起におけるプラズマ遮蔽をはじめとする結合の阻害要因を凌駕するのに十分な引力が実効的に発生するためである。このことは、超高密度励起下においても、共振器損失が小さく熱平衡状態さえ実現すれば、高速のラビ振動が観測され得ることを示唆している。この成果は2編の代表論文(Kamide and Ogawa, Phys. Rev. Lett. 105 (2010) 056401; Phys. Rev. B 83 (2011) 165319)にまとめられている。

共振器ポラリトンの舞台はVECSELレーザーのような単一モードレーザーと似ている。励起密度が高く共振器損失の効果が顕在化する時には、熱平衡を仮定したエネルギー最小化のアプローチよりも、ポンプとロスを含めたMaxwell半導体Bloch方程式(MSBE)の方が系を正しく記述する。非平衡定常状態であるレーザー発振状態において電子間相互作用の役割を解明するため、第一ステップとして、非平衡理論(MSBE)の枠組みの中で明確にすることを年度目標とした。半導体キャリアの定常発振状態を決定するための効率的な計算法を提案し、発振の閾値励起密度、定常発振状態における発振周波数や発振状態の安定性、キャリアの運動量分布関数などのパラメータ（共振器離調、キャリア温度、共振器ロスレートなど）依存性を計算した。特に低温でフェルミ端における電子正孔束縛状態の量子凝縮機構が顕在化し、(非平衡)量子凝縮の前駆現象として鋭いFano共鳴型の利得ピークが生じ得ることが明らかになった。このFano共鳴利得が関与するパラメータ領域でレーザー発振の低閾値化、発振周波数の共振器離調依存性の消失など、特異な

物理現象が生じることが明らかになった。パラメータ空間の中でこのような多体利得が生じる領域と、自由な電子・正孔によるプラズマ利得が生じる領域とを明確に分類する相図を得た。一連の成果は代表論文二篇 (Kamide and Ogawa, Phys. Stat. Solidi C 8 (2011) 1250; Kamide et al., J. Phys. Soc. Jpn. 81 (2012) 093706) と解説記事 (上出・小川, 固体物理 46 (2011) 757) にて発表された。

熱平衡状態と非平衡状態で異なる理論に基づき半導体微小共振器系の定常なコヒーレント発振状態を用いて解析したが、実験報告から励起子ポラリトンの量子凝縮体とレーザー発振状態は励起密度を増加することで連続的につながっている。二つの異なる物理がどのように関係しているのか理論的に明らかにするために、両者を統一的に扱う理論形式を導出し定常発振状態を解析した。はじめに、この理論が熱平衡・非平衡の極限で BCS Gap 方程式 (秩序変数に関するエネルギー最小化方程式) と Maxwell 半導体ブロッホ方程式に帰着することを確認した。次に、この枠組みを用い、共振器損失や励起密度、熱浴温度の関数として定常状態を決定し、相図の中でポラリトン凝縮とレーザーがどのように移り変わるかを明らかにした。この成果は代表論文 (Yamaguchi et al., New J. Phys. 14 (2012) 65001) に発表した。

熱平衡から非平衡までつながるポラリトン凝縮の定常状態をプローブで測定した場合どのような変化が観測されるかについて取り組んだ。ポラリトン凝縮の研究コミュニティでは励起密度 vs 発光強度の関係に見られる二つの異なる閾値によってポラリトン凝縮かレーザーがしばしば区別されるが、我々の理論計算から、非平衡領域に突入せず熱平衡状態のままであっても、高密度領域では第二の閾値は発現することが示されている。従って閾値によっては二者のどちらの状態であるかは判別することはできない。そのため、注目すべき観測量として、利得スペクトルや発光スペクトルを、また定常状態の線形安定性についても計算し、非平衡な性質を有する量子凝縮体の物性に関し理解を深めた。発光スペクトルの中心周波数の両サイドピークの振る舞いや、利得スペクトルにおいて利得が発生するか否かが、ポラリトン凝縮の非平衡性を特徴づける量になることが明らかになった。この成果は代表論文 (Yamaguchi et al., arXiv:1301.4838 (2013)) にて発表する。

また、共振器ポラリトン凝縮系に関連し、連結した共振器 QED 列における光の量子相転移についても、従来の二次相転移ではなく一次相転移が生じ得るという理論提案を行なった。共振器内で光と相互作用する発光体の

種類を変えることで、光子同士の相互作用を実効的に変化させることができ、これによって一次量子相転移が生じるという結果を得た。光の量子状態をスイッチング的に切り替えることが、工夫により可能であることを代表論文 (Kamide et al., arXiv:1301.1869 (2013)) に表した。また、励起の注入や光子の共振器損失を考慮した、非平衡状態における光の量子相転移に関しても解析を始め、非平衡コヒーレント相 (超流動相) におけるプラト状態の発現をはじめとし、特有の新しい物性を発見した。この成果は国際会議 CLEO-PacificRim にて 2013 年 7 月に発表する。(Yuge et al., “Nonequilibrium Phases of Photons in Coupled Cavity QED Array”)

5. 主な発表論文等

(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 26 件)

1. K. Kamide, M. Yamaguchi, T. Kimura, and T. Ogawa: “First-order superfluid-Mott-insulator transition for quantum optical switching in cavity QED arrays with two cavity modes”, Physical Review A 87, 053842/1-11 (2013). (DOI:10.1103/PhysRevA.87.053842), 査読有.
2. R. Maezono, P. L. Rios, T. Ogawa, and R. J. Needs: “Excitons and biexcitons in symmetric electron-hole bilayers”, Physical Review Letters 110, 216407/1-5 (2013). (DOI:10.1103/PhysRevLett.110.216407), 査読有.
3. C. H. Raymond Ooi, K. C. Low, R. Higa, and T. Ogawa: “Surface polaritons with arbitrary magnetic and dielectric materials: New regimes, effects of negative index, and superconductors”, Journal of the Optical Society of America B 29, 2691-2697 (2012). (DOI:10.1364/JOSAB.29.002691), 査読有.
4. K. Kamide, M. Yoshita, H. Akiyama, M. Yamaguchi, and T. Ogawa: “Fano-resonance gain by dephasing electron-hole Cooper pairs in semiconductors”, Journal of the Physical Society of Japan 81, 093706/1-4 (2012). (DOI: 10.1143/JPSJ.81.093706), 査読有.
5. M. Yamaguchi, K. Kamide, T. Ogawa, and Y. Yamamoto: “BEC-BCS-laser crossover in Coulomb-correlated electron-hole-photon systems”, New Journal of Physics 14, 065001/1-33 (2012). (DOI:10.1088/1367-2630/14/6/065001), 査読有.
6. 上出健仁, 小川哲生: 「半導体レーザーにおける電子相関と多体利得」, 固体物理 特集

号『動的光物性の新展開』46, 757-769 (2011). (DOI:), 査読有.

7. K. Kamide and T. Ogawa: “Semiclassical theory for a nonequilibrium steady state in microcavity semiconductor lasers”, *physica status solidi (c)* 8, 1250-1253 (2011). (DOI: 10.1002/pssc.201000855), 査読有.

8. M. Nakatani and T. Ogawa: “Quantum master equations for composite systems: Is Born-Markov Approximation really valid?”, *Journal of the Physical Society of Japan*, 084401/1-9 (2010); Erratum 80, 0580 01 (2011). (DOI: 10.1143/JPSJ.79.084401), 査読有.

9. Y. Tomio and T. Ogawa: “Optical spectra and exciton in correlated insulators in electron-hole systems”, *Journal of the Physical Society of Japan* 79, 104707/1-10 (2010). (DOI: 10.1143/JPSJ.79.104707), 査読有.

10. A. Ishikawa and T. Ogawa: “Carrier dynamics in a quantum wire: Effects of microscopic scattering processes on intraband relaxation and optical properties”, *Journal of the Physical Society of Japan* 79, 014706/1-8 (2010). (DOI: 10.1143/JPSJ.79.014706), 査読有.

11. K. Watanabe, K. Asano, and T. Ogawa: “Auger recombination process of biexciton in semiconducting carbon nanotubes”, *physica status solidi (c)* 6, 300-303 (2009). (DOI: 10.1002/pssc.2008798 97), 査読有.

12. T. Ogawa: “Exciton Mott transition and quantum condensation in electron-hole systems”, *physica status solidi (c)* 6, 28-33 (2009). (DOI: 10.1002/pssc.200779880), 査読有.

13. T. Ogawa and Y. Tomio: “Optical spectra and exciton Mott transition in correlated electron-hole systems”, *Journal of Luminescence* 128, 1022-1024 (2008). (DOI: 10.1016/j.jlumin.2007.11.068), 査読有.

[学会発表] (計 105 件)

1. 上出健仁, 弓削達郎, 山口真, 小川哲生: 「結合共振器列における光の熱平衡及び非平衡相転移」, 日本物理学会第 68 回年次大会, 広島大学東広島キャンパス, 2013 年 3 月 28 日。

2. 山口真, 上出健仁, 新居良太, 小川哲生, 山本喜久: 「共振器ポラリトン凝縮と半導体レーザーの接続理論 (3) - 利得スペクトル -」, 日本物理学会第 68 回年次大会, 広島大

学東広島キャンパス, 2013 年 3 月 28 日。

3. 新居良太, 山口真, 上出健仁, 小川哲生, 山本喜久: 「共振器ポラリトン凝縮と半導体レーザーの接続理論: 自然放出過程の取扱い」, 日本物理学会第 68 回年次大会, 広島大学東広島キャンパス, 2013 年 3 月 28 日。

4. T. Ogawa: “Lasing and polariton condensation in semiconductors”, The 3rd International Symposium on Terahertz Nanoscience (TeraNano III), Honolulu, Hawaii, USA, 10-12 December 2012. (招待講演)

5. T. Ogawa: “Cooperative phenomena in electron-hole and electron-hole-photon systems: Phase transition, crossover, and condensation”, The International Symposium on Molecular Materials and Devices (ISSMMD2012), Durham, UK, 24-29 September 2012. (招待講演)。

6. K. Kamide and T. Ogawa: “First-order phase transition in two-mode Jaynes-Cummings Hubbard model for optical switching”, The 11th International Workshop on Nonlinear Optics and Excitation Kinetics in Semiconductors (NOEKS11), Stuttgart, Germany, 23-27 September 2012.

7. 上出健仁, 小川哲生: 「2 モード結合微小共振器列による光スイッチング」, 日本物理学会 2012 年秋季大会, 横浜国立大学, 2012 年 9 月 19 日。

8. 前園涼, 小川哲生, パブロ・ロペス・リオス, リチャード・ニーズ: 「半導体二層膜の中密度域におけるバイエキシトン気体」, 日本物理学会 2012 年秋季大会, 横浜国立大学, 2012 年 9 月 18 日。

9. 上出健仁, 山口真, 山本喜久, 小川哲生: 「半導体レーザー/ポラリトン凝縮クロスオーバーにおける定常発振状態の線形安定性」, 日本物理学会 2012 年秋季大会, 横浜国立大学, 2012 年 9 月 18 日。

10. 新居良太, 上出健仁, 山口真, 小川哲生: 「二準位系集団からの協力的発光のスペクトル解析」, 日本物理学会 2012 年秋季大会, 横浜国立大学, 2012 年 9 月 18 日。

11. 山口真, 上出健仁, 山本喜久, 小川哲生: 「共振器ポラリトン凝縮と半導体レーザーの接続理論 (2) - 発光スペクトル -」, 日本物理学会 2012 年秋季大会, 横浜国立大学, 2012 年 9 月 18 日。

12. T. Ogawa: “Excitons and polaritons in semiconductors: From one-body to many-body problems”, The 6th International Conference on Spontaneous Coherence in Excitonic Systems (ICSCE-6), Stanford University, USA, 27-31 August 2012. (招待講演)

13. M. Yamaguchi, K. Kamide, T. Ogawa, Y. Yamamoto: “Bose-Einstein condensation and lasing in Coulomb-correlated electron-hole-photon systems”, The 6th International Conference on Spontaneous Coherence in Excitonic Systems (ICSCE-6), Stanford University, USA, 27-31 August 2012.
14. T. Ogawa: “Condensation and lasing in electron-hole-photon systems”, The International Workshop on Optical Science of Dynamically Correlated Electron Systems, Kussharo, Japan, 7-11 August 2012. (招待講演)
15. K. Kamide and T. Ogawa: “Fano resonance gain in semiconductor lasers” (invited), The International Workshop on Optical Science of Dynamically Correlated Electron Systems, Kussharo, Japan, 7-11 August 2012.
16. K. Kamide, M. Yamaguchi, Y. Yamamoto, and T. Ogawa: “Stability of semiconductor lasers, electron-hole-photon condensates, and their hybrids between kinetic and thermal-equilibrium regime”, The 10th International Conference on Excitonic Processes in Condensed Matter, Nanostructured and Molecular Materials (EXCON2012), Groningen, The Netherlands, 1-6 July 2012.
17. M. Yamaguchi, K. Kamide, T. Ogawa, and Y. Yamamoto: “Crossover among BEC, BCS and laser in Coulomb-correlated electron-hole-photon system”, The 10th International Conference on Excitonic Processes in Condensed Matter, Nanostructured and Molecular Materials (EXCON2012), Groningen, The Netherlands, 1-6 July 2012.
18. T. Ogawa: “Cooperative phenomena in population-inversion states of semiconductors: lasing and polariton condensation”, The 1st DYCE Asia Workshop, Tokyo, Japan, 23-24 April 2012. (招待講演)
19. 山口真, 上出健仁, 小川哲生, 山本喜久: 「共振器ポラリトン凝縮と半導体レーザーの接続理論」, 日本物理学会第 67 回年次大会, 関西学院大学西宮上ヶ原キャンパス, 2012 年 3 月 26 日。
20. 新居良太, 上出健仁, 山口真, 小川哲生: 「二準位系間の相関が超蛍光/超放射の光子統計に与える影響」, 日本物理学会第 67 回年次大会, 関西学院大学西宮上ヶ原キャンパス, 2012 年 3 月 26 日。
21. T. Ogawa: “Physics of excitons: From single-body characteristics to many-body phenomena”, Summer School on “Modern Progress of Fundamental Physics”, Danang, Vietnam, 1-3 December 2011. (招待講演)
22. T. Ogawa: Photoinduced cooperative phenomena in electron-hole and electron-hole-photon systems”, International Symposium on “Trends in Nanomaterials: From Biomacromolecules to Inorganics”, Bandung, Indonesia, 7-11 November 2011. (招待講演)
23. 山口真, 上出健仁, 小川哲生: 「共振器ポラリトン凝縮におけるゆらぎの理論」, 日本物理学会 2011 年秋季大会, 富山大学五福キャンパス, 2011 年 9 月 24 日。
24. 近藤祐介, 上出健仁, 小川哲生: 「結合微小共振器列の量子相からの発光スペクトル」, 日本物理学会 2011 年秋季大会, 富山大学五福キャンパス, 2011 年 9 月 24 日。
25. 上出健仁, 吉田正裕, 秋山英文, 小川哲生: 「半導体レーザーにおける多体利得の分類」, 日本物理学会 2011 年秋季大会, 富山大学五福キャンパス, 2011 年 9 月 24 日。
26. 上出健仁, 横山弘之, 陳少強, 吉田正裕, 秋山英文, 山口真, 小川哲生: 「強励起利得スイッチング半導体レーザーの動的周波数シフト」, 日本物理学会 2011 年秋季大会, 富山大学五福キャンパス, 2011 年 9 月 23 日。
27. K. Kamide, M. Yoshita, H. Akiyama, and T. Ogawa: “Single-mode laser operation with many-body gain in semiconductor microcavities”, The International Conference on Optics of Excitons in Confined Systems (OECS12), Paris, France, 12-16 September 2011.
28. K. Kamide and T. Ogawa: Many-body model for single-mode laser operations in semiconductor microcavities”, The International Quantum Electronics Conference and The Conference on Lasers and Electro-Optics (IQEC/CLEO Pacific Rim 2011), Sydney, Australia, 28 August-1 September 2011.
29. T. Ogawa and K. Kamide: “Phase transition and crossover in electron-hole-photon systems”, The 4th International Conference on Photoinduced Phase Transitions and Cooperative Phenomena (PIPT 4), Wroclaw, Poland, 28 June-2 July 2011.
30. 上出健仁, 小川哲生: 「微小共振器半導体レーザーの微視的理論 II: 発振閾値と揺らぎスペクトル」, 日本物理学会第 66 回年次大会, 新潟大学五十嵐キャンパス, 2011 年 3 月 25 日。
31. T. Ogawa: “Phase transition and crossover in exciton and polariton systems”, Alexei Ivanov Memorial

Symposium, Cardiff, UK, 23 February 2011. (招待講演)

32. 上出健仁, 小川哲生: 「微小共振器半導体レーザーにおける定常発振状態の微視的理論」, 日本物理学会 2010 年秋季大会, 大阪府立大学中百舌鳥キャンパス, 2010 年 9 月 17 日。

33. K. Kamide and T. Ogawa: “Semiclassical theory for a nonequilibrium steady state in microcavity semiconductor lasers”, 10th International Workshop on Nonlinear Optics and Excitation Kinetics in Semiconductors (NOEKS 10), Paderborn, Germany, 16-19 August 2010.

34. K. Kamide and T. Ogawa: “Crossover of laser-like behavior in a microcavity polariton condensate” 30th International Conference on the Physics of Semiconductors (ICPS 2010), Seoul, Korea, 25-30 July 2010.

35. T. Ogawa: “BEC-BCS crossovers in electron-hole and electron-hole-photon systems”, 9th International Conference on Excitonic and Photonic Processes in Condensed and Nano Materials (EXCON 2010), Brisbane, Australia, 11-16 July 2010.

36. T. Ogawa and K. Kamide, “From exciton to photon condensation via polariton in electron-hole-photon systems”, 17th International Conference on Dynamical Processes in Excited States of Solids (DPC 10), Argonne, USA, 20-25 June 2010.

37. 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. (招待講演)

38. 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, 岡山大学津島キャンパス, 2010 年 3 月 20 日。(招待講演)

39. 上出健仁, 小川哲生: 「共振器ポラリトン系におけるボース凝縮のエキシトン-光子クロスオーバー: 基底エネルギー」, 日本物理学会 2009 年秋季大会, 熊本大学黒髪キャンパス, 2009 年 9 月 22 日。

40. 上出健仁, 小川哲生: 「共振器ポラリトン系におけるボース凝縮のエキシトン-光子クロスオーバー: 変分波動関数, 内部構造」, 日本物理学会 2009 年秋季大会, 熊本大学黒髪キャンパス, 2009 年 9 月 22 日。

41. K. Kamide and T. Ogawa: “Crossover from excitonic to photonic condensation in microcavity polariton systems”, International Conference on Optics of Excitons in Confined Systems (OECS 11), Madrid, Spain, 7-11 September 2009.

42. 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. (招待講演)

43. T. Ogawa: “Quantum cooperative phenomena in photoexcited insulators: Electron-hole plasma and exciton gas”, International Workshop on Warm Dense Matter (WDM2009), Hakone, Japan, 16-19 March 2009. (招待講演)

[その他]

ホームページ等

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

6. 研究組織

(1) 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

(2) 研究分担者

()

研究者番号:

(3) 連携研究者

()

研究者番号: