

戦略的創造研究推進事業
ナノテクノロジー分野別バーチャルラボ

研究領域「新しい物理現象や動作原理に基づく
ナノデバイス・システムの創製」
研究課題「光電場のナノ空間構造による
新機能デバイスの創製」

研究終了報告書

研究期間 平成14年11月～平成20年3月

研究代表者：石原 一
(大阪府立大学 大学院工学研究科、
教授)

1 研究実施の概要

【研究の構想】

「試料内における光電磁場の微視的空間構造は無視して良い」という、固体の光学応答の分野で長年親しまれてきた「常識」はナノ系を対象とした研究においても主流を占めてきた。しかし近年代表者等は、純度や均一性などが高度に制御されたナノ試料中では、物質の素励起(励起子など)と共鳴的に相互作用した内部光電場においてはナノ空間パターンが支配的になり、あるいは分極波のコヒーレント長が内部光波長を越えるなどの理由で両者の空間構造のインタープレイが重要な役割を果たす可能性を指摘してきた[1]。

本チームではこのような、従来の光学応答では無視されてきた内部光電場のナノ空間構造に着目し、長波長近似の枠を超えた新しい光学原理がデバイス開発の重要な基礎となることを実証するため、本研究をスタートさせた。本プロジェクトでは以下の3つのサブプロジェクトを設定し、それぞれ実験担当グループと理論グループが協力する体制で研究を進めた。

1) 半導体薄膜構造による高効率光スイッチのデモンストレーション

非線形性の大きさと応答の高速性を高いレベルで両立させることは、光スイッチデバイス開発における最重要課題である。本項目では、研究代表者らが提案した非長波長効果による巨大非線形過程の研究を中心に据え、この課題に臨んだ。プロジェクトに先立ち、GaAsヘテロ構造を用いて内部電場の共鳴増大による「非双極子の励起子準位による」巨大非線形信号のサイズ共鳴増大が実験的に確認されており、またこの準位の輻射緩和が100nm程度の膜厚で高速化することも確認されていた。本項目では、GaAs系のナノ構造制御技術を駆使し、代表者が提案する基本原理に基づいた効果が最大に現れる構造を見だし、デバイス機能開発における当該原理の有効性を実証することを計画した。本項目はGaAs試料による上記実験を成功させた井須グループ(超高速光スイッチグループ)が実験を担当した。

2) II-VI, I-VII系薄膜、量子ドットを用いた新材料開発と新奇現象の探索

実験的には1)のようにGaAs系材料によって代表者らの提案が実証されているが、性能のポテンシャルとしてはII-VI, I-VII系などが強い励起子効果のため桁違いのものを有すると期待された。また、提案された原理に基づいたデバイス動作を多様な条件で実現するためにもGaAs系以外の材料系や、励起子広域コヒーレンスが発現する様々な試料形状の研究が不可欠である。この観点から本項目ではCuCl量子ドットや薄膜の独自の作製法を開発し、励起子コヒーレント現象と光波動のインタープレイがもたらす新奇な光学効果の研究を計画した。具体的には量子ドット系やMBE法で作製した薄膜構造の光学的性質を非線形スペクトル分解、時間分解等の手法で調べ、励起子の広域コヒーレント状態の制御とデバイス応用の可能性を追求した。本項目はCuCl量子ドットや薄膜技術の蓄積がある伊藤グループ(新現象・新材料探索グループ)が実験を担当した。

3) 光電場のナノ空間構造による高非線形を利用したユニバーサル量子位相ゲートの開発

上記1), 2)は古典光入射に対する応答を対象にした研究であるが、同様な効果が光子数確定状態などの非古典光に対しても期待できると考えた。本項目では特に、単一光子レベルでの巨大な光学非線形性を用いたユニバーサル量子位相ゲート技術への挑戦を試みた。この研究ターゲットに対しては以下の3つの目標達成が必要となる。(A)高効率な相関光子対の発生。(B)極微弱光での非線形位相シフト計測技術の開発。(C)単一光子レベルでの高非線形材料の開発。本項目では、巨大光学非線形物質として想定しているCuClのナノ構造半導体に共鳴する光子エネルギー領域を主な対象として、以上の技術を開発することを計画した。本項目は相関光子技術の蓄積がある枝松グループ(量子位相ゲートグループ)が実験を担当した。

【研究実施内容および成果】

以下、サブプロジェクト毎に研究実施内容と成果について説明する。

1) 超高速光スイッチ

プロジェクトに先立って実験実証されていたGaAsナノ構造の巨大非線形性についてはピコ秒レーザーを用いてその応答特性が調べられたが[2][3]本プロジェクトではフェムト秒パルスを用いてサブピコ領域でのダイナミクスを詳細に調べ、高非線形性と高速性が両立する可能性を追求した。特に本研究では非線形応答の高精度時間分解測定系の構築を進め、時間特性と応答スペクトルの関係を詳細に明らかにできる測定系の構築に注力した。

フェムト秒の幅広いスペクトルを持つパルス励起により非線形光学応答を実時間領域およびスペクトル領域の両面から精密に観測した結果、特に重要な結果として、複数の励起子状態の同時励起による非線形応答が、ピコ秒パルス励起の場合とは異なったダイナミクスを示すことが明らかになった。励起子準位間の干渉効果により、位相緩和信号、配向緩和信号、光カー回転信号において巨大非線形を保ったまま励起パルス幅程度の超高速応答が得られることが分かった。位相緩和速度を上回る超高速応答信号が得られたことは、この特性を使った新奇な超高速光スイッチ動作実現の可能性を示唆しており特筆すべき成果である。

さらにデバイス利用の観点から上記機構の特質を探り、以下の点が確かめられた。すなわち、励起子密度の残留は応答の時間波形にほとんど影響せず、また強度減少は強度に対して飽和傾向が見られ、超高速光スイッチ動作においてこの超高速応答が生かされる。さらに光カー信号についても、同様に先行の光パルスによる励起子密度の増加があっても時間信号波形形状への影響がほとんどない。このように本サブプロジェクトでは複数準位の同時励起による超高速応答は、内部電場のナノ空間構造による巨大非線形性と両立する光スイッチの新しい動作原理として非常に有用であることを示すことができた。

2) 新現象・新材料探索

本サブプロジェクトではCuCl 薄膜、及びCuCl 量子ドット集合系の2種のタイプの試料による新奇光学応答の探索を行った。薄膜についてはMBE法と電子線照射を用いた方法により表面モフォロジーを大幅に改善し、励起子重心運動のコヒーレンスが非長波長近似領域まで明瞭に確認できる極めて高品質な試料の作製に成功した。この試料に対してフェムト秒パルスを用いた四光波混合実験を行い、大きな非線形応答が確認された。さらに励起子波動関数と輻射場の空間的相関が何波長にも渡って保たれ、数100nmの薄膜中での巨大な輻射結合が形成されていることを示す分光結果が得られた[4]。励起子の励起寿命を計る過渡回折分光の結果、巨大な輻射結合による100フェムト秒を切る超高速輻射緩和の存在が明らかになり、さらにGaAsの場合と同様の励起子間干渉により、数10フェムト秒の高速応答が起こることも確認できた。この機構の詳細な解明は超高性能デバイス開発への新しい指導原理に直結するものと期待される。またCuCl 量子ドット集合系の光学応答では、これまでに例のない、励起子分子系の超放射現象が確認された。この現象では2光子励起により励起子分子を直接生成することにより容易に反転分布が形成され、条件によって極めて効率的にレーザー発振や超放射が起こり、高速デバイスの新しい機構として注目に値する。

一方、本サブプロジェクトでは当初の計画にはなかった高コヒーレンス材料作製への全く新しい手法として光マニピュレーションの実証実験を行った。研究代表者等はこれまで、共鳴レーザー光照射時にナノ物質に印加される輻射力が個々のナノ物質の量子力学的個性に依存して選択的に働くことを利用して、量子ドットのnmオーダーのサイズ選択等が可能になることを提案してきた[5]。本サブプロジェクトでは、超流動液体ヘリウム中においてレーザーアブレーションにより作製したCuCl 量子ドットのうち、粒径20-50nmの量子ドットがフェムト秒パルスの照射で選択的に光輸送可能であることを確認した[6]。さらに、線幅の細いレーザーほどサイズが良く選別されることも確認できており、微小物質の力学的運動と内部量子自由度をリンクさせる初めての試みに成功した。

3) 量子位相ゲート

本サブプロジェクトでは第一の目標である高品質な相関光子対生成のため、CuClバルク結晶におけるハイパーパラメトリック散乱過程に着目した。この過程では2光子共鳴励起により励起子分子が生成され、これがポラリトン状態を経由して崩壊する際に発生する2個の光子が量子力学的に相関する(もつれ合う)と考えられた。この過程を利用した実験の結果、世界初である半導体からのもつれ合い光子対の生成に成功した[7]。また、その成果をさらに高度化し、量子もつれをもつ光子対以外の光子の寄与を大幅に小さくして、統計的処理を施すことなく高純度の量子もつれ光子対を発生することにも成功した[8]。さらに新しい量子もつれ光源の開発にも着手し、パラメトリック下方変換によって発生した光子対の空間的量子相関を偏光の量子相関に変換する新しい手法を開発した。ここではType-2擬似位相整合非線形結晶から準同軸で生じるパラメトリック下方変換光が、偏光に関する量子もつれを有することを見出し、検証実験によりこれを実証した。

また、単一光子による量子位相ゲートの実現に向け、少数光子による微小な非線形位相シフトの測定方法を開発した[9]。これまで開発してきたSagnac干渉計にロックイン検出法を組み合わせ、フォトニック結晶ファイバを非線形媒質として、励起レーザーパルスあたり平均1個以下の光子による非線形位相シフト(10^{-8} ~ 10^{-7} rad程度)が観測可能であることを実証した。

上記研究において、本プロジェクトでは理論グループがチーム研究全体に渡り、実験のサポートと新しい理論的提案を行ったが、以下にその主要成果をまとめる。

【1】励起子-光結合状態が非長波長近似領域で輻射補正の特異なサイズ依存性を示し、準位交換や、巨大輻射緩和定数などが現れることを理論的に示し、これらが本プロジェクトの主要ターゲットとなった。これらの現象は実験的にも検証された[10][11]。

【2】光マニピュレーションの予想に続き、光により微粒子間相互作用が誘起され、自己組織化の制御や力学的顕微鏡に用いられることを議論した[12][13]。

【3】光子数確定状態の非線形応答理論を確立し、特に、全量子論をバイパスして位相シフトを計算する新しい手法を開発した[14][15]。

【4】位相シフト量と原子数のトレードオフの問題を明らかにし[16]、またこのトレードオフを克服する誘導吸収による2光子非線形の方法を提案した。(論文準備中)

【5】物質と輻射の両方の波動性を正しく取り入れることのできる全量子論を開発した。(論文準備中)

【6】薄膜の閉じ込め準位や共振器を用いたもつれ合い光子対生成効率の増強理論を提案した[17]。

【主要参考文献】

- [1] H. Ishihara and K. Cho: Phys. Rev. B **53** 15823 (1996)
- [2] K. Akiyama, N. Tomita, Y. Nomura and T. Isu: Appl. Phys. Lett. **75** 475 (1999)
- [3] H. Ishihara, K. Cho, K. Akiyama, N. Tomita, Y. Nomura and T. Isu: Phys. Rev. Lett. **89** 017402 (2002)
- [4] M. Ichimiya, M. Ashida, H. Yasuda, H. Ishihara and T. Itoh: phy. stat. sol. (b) **243** 3800 (2006)
- [5] T. Iida and H. Ishihara: Phys. Rev. Lett. **90** 057403 (2003)
- [6] K. Inaba, K. Imaizumi, K. Katayama, M. Ichimiya, M. Ashida, T. Iida, H. Ishihara, and T. Itoh: phys. stat. sol. (b) **243** 3829 (2006) [Editor's Choice]
- [7] K. Edamatsu, G. Oohata, R. Shimizu and T. Itoh: Nature **431** 167 (2004)
- [8] G. Oohata, K. Edamatsu, R. Shimizu: Phys. Rev. Lett. **98** 140503 (2007)
- [9] N. Matsuda, Y. Mitsumori, H. Kosaka, K. Edamatsu, and R. Shimizu: Appl. Phys. Lett. **91**, 171119 (2007)
- [10] H. Ishihara, J. Kishimoto and K. Sugihara: J. of Lumin. **108**, 342 (2004)
- [11] A. Syouji, B. P. Zhang, Y. Segawa, J. Kishimoto, H. Ishihara, K. Cho: Phys. Rev. Lett, **92**, 257401 (2004)
- [12] T. Iida and H. Ishihara: Phys. Rev. Lett. **97** 117402 (2006)
- [13] T. Iida and H. Ishihara: Nanotechnology **18** 084018 (2007)
- [14] K. Koshino and H. Ishihara: Phys. Rev. A **70** 013806 (2004).

- [15] K. Koshino and H. Ishihara: Phys. Rev. Lett. **93** 173601 (2004)
[16] K. Koshino and H. Ishihara: Phys. Rev. A **71** 063818 (2005)
[17] H. Ajiki and H. Ishihara, J. Phys. Soc. Jpn. **76**, 053401 (2007)

2 研究構想及び実施体制

(1) 研究構想

【研究開始時の目標】

超高速光スイッチグループ

非線形性の大きさと応答時間の速さを高いレベルで両立させることは、光スイッチデバイス開発に於いて最重要課題とされている。本グループでは、研究代表者らの提案する巨大非線形過程の研究に基づき、この課題に挑戦した。プロジェクトにさきがけ、GaAsヘテロ構造を用いて非双極子の励起子準位による非線形信号のサイズ共鳴増大が実験的に確認され、またこの準位の輻射緩和定数が100nm程度の膜厚でサイズ増大することが確認されていたが、理論的には環境層の構造や条件を工夫することにより高非線形性を保ったまま数10fs級の応答速度が可能と考えられた。本項目では、融着試料作製法などを用いて環境層を含む構造を多様化するなど、様々な条件下で研究を行い、予言されたパフォーマンスが実現される最適な構造を見出すこと、さらにこれらの物性評価から得られる知見に基づいてデバイス作製への展開を図ることを計画した。

新現象・新材料探索グループ

性能のポテンシャルとしては(強い励起子効果のため) GaAs系材料に比べて桁違いのものを有するCuCl などII-VI, I-VII系において閉じ込め系の広域コヒーレンスが発現する条件の探索を計画した。第一にMBE法によって作製されるCuCl薄膜をターゲットとした。この材料系ではマクロな領域内に埋もれた単一ナノ構造のコヒーレント効果を観測する技術をデバイスに応用する観点から開発することとした。具体的には量子井戸構造の光学的性質をスペクトル分解、時間分解等の手法で解析し、励起子の広域コヒーレント状態の制御可能性、高非線形性と高速応答の両立の条件を探る。また量子ドット系での新奇光学応答を探る上で、ナノスケール非線形分光の位置分解能を上げるために新しい手法として走査電子顕微鏡とレーザー、高分解能分光器を組み合わせたレーザーアシスト低温カソードルミネッセンス法を開発して用いることを計画した。

量子位相ゲートグループ

光電場のナノ空間構造を利用し、単一光子レベルで光学非線形性を示すナノ構造物質の開発とそれを用いたユニバーサル量子ゲートの実現を目指した。単一光子レベルの超微弱光に対して十分な非線形性を有する材料を開発するため、量子相関をもった非古典的光子対を用いることによる高非線形性と「光のナノ空間構造」が顕著となる広域コヒーレント状態による高非線形性の相乗効果を追求することを計画した。枝松グループ、理論グループによりこの観点から(特に共振器構造を組み合わせた) ナノ構造の理論解析および素子設計を行い、井須グループ、伊藤グループが実際の試料供給を行う。得られた試料に対しコヒーレントパルス光の縮退4光波混合などにより非線形性能の評価を行い、これを試料作製にフィードバックさせる作業を通して、単一光子レベルでの量子位相ゲートを実現することとした。

[5年間の研究計画]

項目	平成14年度 (5ヶ月)	平成15年度	平成16年度	平成17年度	平成18年度	平成19年度 (7ヶ月)
理論による構造提案 (光スイッチ)	←→					
装置設計 (融着装置)	←→					
試料作製 (光スイッチ)		←→				
物性評価 (光スイッチ)	←→					
デバイス設計、試作		←→				
デバイス機能評価					←→	
MBEによるCuCl試料作製	←→					
試料分光	←→					
非線形性評価		←→				
設備導入 (CL装置)	←→					
CLによる線形応答評価		←→				
CLによる非線形応答評価			←→			
デバイス構造の設定と作製				←→		
CuClの長時間保持法の開発とデバイス試作					←→	
理論による構造提案 (量子位相ゲート)	←→					
試料のプロセス技術の検討と試作		←→				
非線形性能評価			←→			
相関光子パルス列光源の開発		←→				
量子位相シフト量の評価			←→			
量子位相ゲートの作製と動作確認				←→		
まとめ						←→

【期間中の新しい展開による目標】

本プロジェクトでは上記の初期目標に加え、期間中の次のような新たな展開による目標が設定された。

【1】励起子多準位間干渉による光スイッチ動作の高速化とデバイス性能の検証

GaAs 系試料を用いたフェムト秒パルス励起では何らかの位相緩和機構により励起子密度が残留するという問題が生じたが、一方で、フェムト秒パルス励起にともなう多準位間の干渉効果により、入射パルス幅程度の極めて高速な応答信号が得られるという重要な成果を得た。さらに、励起子密度が残存していても時間応答形状が変化せず超高速応答特性が維持されることも分かり、プロジェクト後半はこの機構を用いたサブピコ秒の応答と高い非線形効率を併せ持つ光スイッチ動作のデモンストレーションを重要課題に設定した。

【2】光-励起子長距離結合状態による超高速応答の追求

高品質な試料が作製しやすい、100-300nm の試料についてもフェムト秒パルスによる四光波混合 (DFWM) を測定していたところ、長波長近似を遙かに超えた長距離結合から生じる巨大な輻射補正を含んだモードを完全に捉えていることが明らかになった。このようなモードには輻射緩和速度にして 100fs を優に切るものも含まれ、理論的にはさらに高速な数 10fs の輻射緩和も可能であることが明らかになった。この発見は、デバイス応用上貴重であるだけでなく、光と物質の相互作用の本質に関わる極めて重要な物理的問題にも関係する。さらに数 10fs の輻射緩和時間は、室温近くでの位相緩和時間をも凌ぐ可能性があり、位相緩和に支配されずにコヒーレントな光学プロセスが終了するという、未経験の物理的状況も視野に入ってくる。その様な理解から、プロジェクト後半はこの現象の追求を最重要目標の一つとした。

【3】光マニピュレーションの実験検証

プロジェクト途中より「量子ドットの光マニピュレーション」の実験実証を目標に加えた。本研究は当初の計画にはなかったが、プロジェクト以前に代表者が理論提案していた共鳴光学応答を用いた量子ドットの光マニピュレーションについて、チーム内の議論から実験検証の方法が考案されたため、高コヒーレンス材料作製の新しい手法の開発という動機からこれを推進することにした。

【4】原子数と位相シフトのトレードオフの克服

2光子非線形効果の理論的研究を行う過程で、高効率な2光子非線形実現のためには、光子数確定パルスの時空間制御技術と、多自由度系における非線形性能確保の新しいスキームが必要であることが明らかになった。この研究過程で、古典光入射のモデルを用い、全量子論をバイパスして光子数確定状態による位相シフトや波動関数を評価する理論的手法が得られたが、この手法に基づいて、多自由度系において光子数確定状態の非線形性能を確保する新しい手法の理論的提案を新たな目標として設定した。

【各研究グループの役割】

超高速光スイッチグループ

半導体構造の適切な設定により内部光電場の微視的な空間構造を制御し、非線形光学応答の大きさと高速応答特性が高いレベルで両立する高性能な超高速光スイッチングデバイスを開発する。具体的には試料の多層化、周辺環境層などの構造最適化のための試作と機能評価を行なう。半導体内部電場の微視的空間構造を適切に利用する事を指導原理とした新しい超高速光デバイスの開発の実例を示す役割を持つグループである。

新現象・新材料探索グループ

半導体ナノ構造物質として特異な励起子閉じ込め効果を示すCuClその他の量子ドット、量子井戸構造をMBE法によって成長し、その光学的性質をスペクトル分解、時間分解、高密度励起等の手法で解析する。特に新しい手法として走査電子顕微鏡とレーザー、高分解能分光器を組み合わせたレーザーアシスト低温カソードルミネッセンス法を開発し、ナノスケール非線形分光の位置分解能の向上を図る。光電場の微視的空間構造が重要な役割を果たす新しい物理現象やナノ構造を探索する役割を持つグループである。

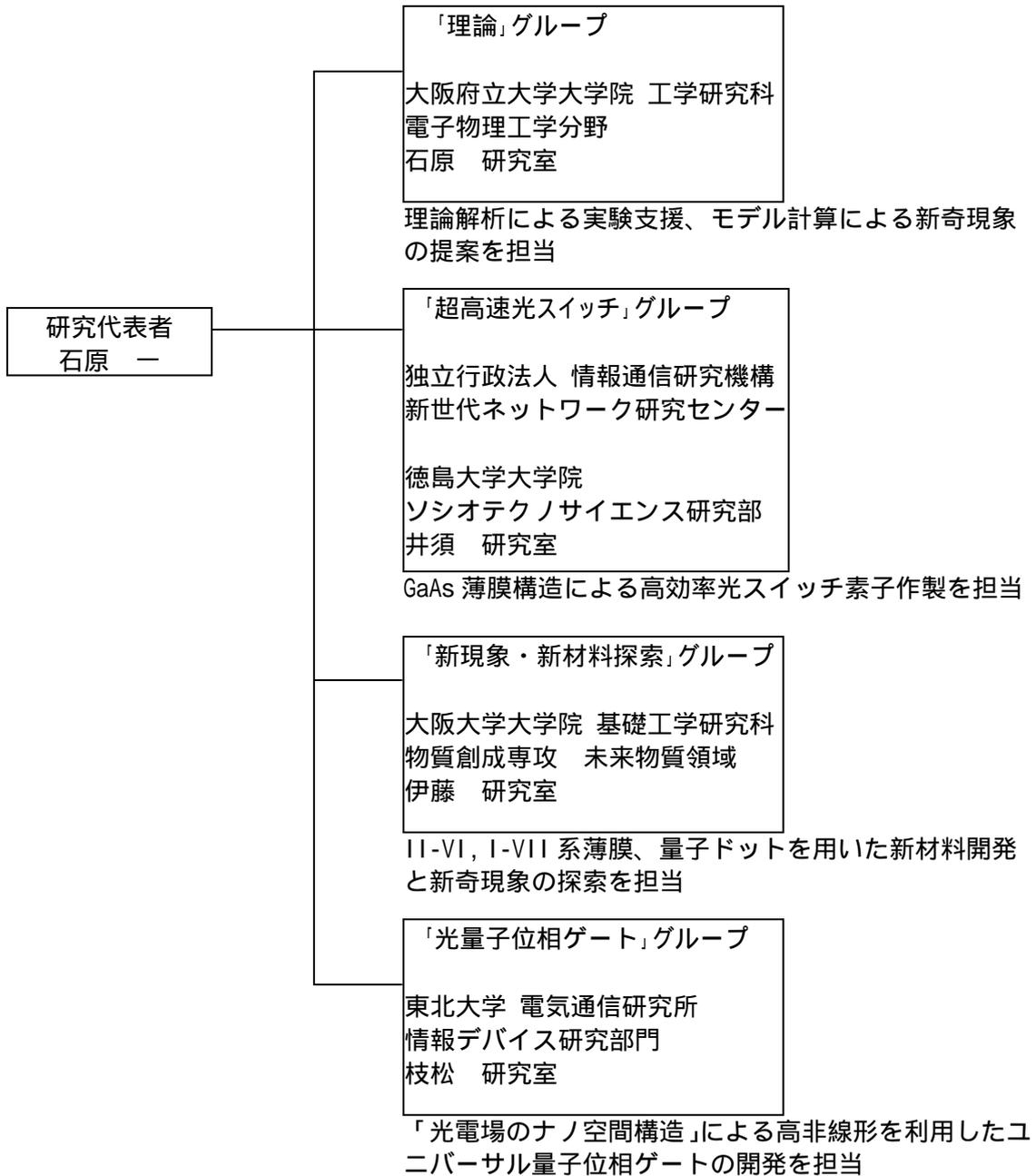
量子位相ゲートグループ

光子対の量子相関と「光電場のナノ空間構造」が顕著となる広域コヒーレント状態による巨大光学非線形性の相乗効果を研究する。光キャビティーと非局所性を有する励起子活性試料の組み合わせによるデバイスの設計、試料のプロセス技術の検討と試作を伊藤、井須両グループの支援を受けて行う。作製された試料の非線形性能評価、量子位相ゲートの動作確認を担当する。非局所性誘起の極めてコヒーレンスの高い非線形過程を単一光子レベルの非線形動作に応用可能であることを示す役割を持つグループである。

理論グループ

内部電場の微視的空間構造を取り入れた理論的手法により、実験3グループの支援を行う。「超高速光スイッチG」については、多層構造、キャビティー構造のどのような組み合わせが非線形性と高速性両立のために最適であるかを定常状態、過渡応答の両面から検討する。「量子位相ゲートG」については内部電場の微視的空間構造と非古典光の応答の関係を明らかにし、その結果に基づいて最適構造を検討する。「新材料探索G」についてはCuClなどII-VI、I-VII系の薄膜構造、ドット構造の線形、非線形応答の計算を行い実験結果との比較検討を行う。

(2)実施体制



3 研究実施内容及び成果

3.1 光電場のナノ空間構造を利用した超高速光スイッチの開発 (情報通信研究機構・(徳島大学) 井須グループ)

(1) 研究実施内容及び成果

(3-1-1) 概要

本グループは当初、三菱電機先端技術総合研究所において、2名の研究者でスタートしたが、研究場所を独立行政法人情報通信研究機構に移すとともに、研究メンバーを徐々に増加し、またさらに研究メンバーの異動もあったため、最終年度には所属は3組織にまたがる7名のメンバーで実施した。

本グループは、ナノスケールの半導体薄膜における電子系との相互作用により生じる内部光電場のナノ空間構造を制御することにより、非線形光学応答の大きさと高速性の両立を図り、これまでにない高い非線形性、超高速性を有する新しい高機能な超高速光スイッチを創製することを目指した。このため、GaAs系化合物半導体多層薄膜構造をMBE法等により作製し、内部電場制御のための構造作製技術を確立するとともに、その非線形光学応答特性の詳細を実験的に明らかにし、光スイッチの機能を実証することを目指して研究を実施した。

初年度・第二年度(H14・15年度)においては、半導体多層膜の構造を制御することにより、高い非線形性と超高速性が両立する光ゲートデバイスの動作実証を目指し、理論グループと共同で、その構造の探求を進めた。その結果として、理論グループにより、閉じ込め励起子と輻射場の結合モードの実部(輻射シフトを含む固有エネルギー)と虚部(輻射幅)の詳細が薄膜の場合で調べられ、試料構造と非線形応答の大きさ、或いは輻射緩和時間の関係はこれらの情報から読み取れることが明らかにされた。また、励起子活性層のみならず、環境層のナノオーダーの構造変化が活性層内部の電場振幅と位相を変化させ、これによって非線形応答と輻射緩和時間が劇的に制御できることが明らかにされた。一方、本グループでは従来からの理論グループの予想を検証すべく、GaAs/AlGaAsダブルヘテロ構造を3から5層積層した多層周期構造における光学応答の基礎評価を試み、その結果、多層周期構造の周期数を増加することにより励起子輻射緩和時間が短縮する傾向を見出した。ただし、励起子時間応答の定量的解析をおこなうには、実験、理論両面でさらに精度を上げた検討を行うことが必要であることがわかった。

このため、半導体活性層と様々な環境層を精密に制御して作製する融着による構造作製の技術開発に着手した。融着による試料作製は、試料構造の自由度をあげ、より高機能な特性を実現するための構造探索が期待できるものである。H16年度においては、実験、理論両面で精度を上げた定量的な解析をおこなうための検討を続けてすすめた。作製可能な試料構造の設計と結晶成長による作製条件の検討、半導体試料の融着による構造作製の技術についての検討を行うとともに、これらの実験設備の整備に注力した。また、吸収によるキャリア生成がなく本質的な超高速応答性を発揮できる二光子共鳴非線形性を、透過モードの高い光学状態密度を用いて増大できるGaAs/AlAs、AlGaAs/AlAsの40~50周期の多層膜構造について、その非線形光学応答の基礎評価を行い、適正なパルス幅では4~5桁の信号増大ができることを確認した。この結果は作製された試料が励起子過程を用いた場合にも大きな非線形性増大が期待でき、また多数の多層膜が、設計どおりの均一性と十分な光学的品質に達していることを示したものである。また、多層周期構造の持つ優位性を生かした新たな光ゲートスイッチの可能性を示すものでもありとえられる。GaAsダブルヘテロ構造におけるGaAs薄膜中の閉じ込め励起子の光学応答については、周

辺環境層構造依存性を明らかにするとともに、より高機能な特性を実現するための構造の探索のためにも、より詳細にその光学応答特性を解明することが必要である。このため、精度を上げた非線形応答の時間分解測定系の構築を進めた。特に、励起子の光学応答の高分解の時間依存性や応答スペクトルを詳細に実験的に測定するための測定系の構築に注力した。

半導体ダブルヘテロ構造薄膜に弱く閉じ込められた励起子の非線形光学応答は、これまでの研究から、特定の膜厚で非線形光学応答が共鳴的に増大し且つ高速の応答を示すことが示されている。この応答は励起子閉じ込めの2番目の準位が大きな寄与をしており、この準位に共鳴したピコ秒パルスによりその応答特性が調べられてきたが、より高速な応答を探求するためにH17年度からはフェムト秒レーザーによるサブピコ秒パルス励起における非線形光学応答を時間分解およびスペクトル測定の両面から観測し、閉じ込め励起子のダイナミクスを調べた。サブピコ秒のパルスは幅広いスペクトルを持ち、励起子の複数の状態を同時励起することになる。その結果、これまでのピコ秒パルス励起の場合とは異なった非線形光学応答が得られ、異なったダイナミクスが存在する可能性を明らかにした。

上記の結果に基づき、H18年度はこうした閉じ込め励起子に対する超高速応答のダイナミクスを明らかにするため、励起子のさまざまな緩和過程についてピコ秒パルスからサブピコ秒パルスにわたってその特徴を調べた。その結果、GaAs/AlGaAsダブルヘテロ構造中の弱閉じ込め励起子に対して、サブピコ秒パルスにより複数の励起子準位を同時に励起した場合、励起子密度緩和は遅いものの、励起子準位間の干渉効果により超高速応答が得られることを明らかにした。さらに、位相緩和信号のみならず、配向緩和信号、光カー回転信号においても、同様に複数準位の同時励起により、励起パルス幅程度の超高速応答が得られることを明らかにした。当初想定していた励起子密度を超高速の輻射緩和により緩和させ、光スイッチの超高速動作に応用することは、GaAs弱閉じ込め励起子に対してはその遅い励起子密度緩和のために、困難であることがわかったものの、位相緩和速度を上回る超高速信号応答を得られたことは、この特性を使った新奇な超高速光スイッチ動作の実現の可能性を示したものであり、特筆すべき結果であるといえる。

そこで、最終年度のH19年度では、超高速信号と励起子密度緩和の関係を明らかにしていくと共に、超高速光カー信号の検証をすすめた。また従来から進めていた周辺環境層の制御としてのDBR膜とGaAsダブルヘテロ構造活性層との融着による試料作製において、その光学的特性の評価を行い、大きな信号強度が得られ、光学特性の大きな劣化なく作製できたことを確認した。今後、さらに作製技術の改善を図る必要はあるものの、環境層の基本的な効果を評価する上で十分な特性を持つ試料作製ができる技術を開発できた。縮退四光波混合の超高速応答信号については、励起子密度の残留により、その信号強度に対する影響はあるものの、応答の時間波形についてはほとんど影響せず、超高速応答が得られることが明らかとなった。強度減少は強度に対して飽和傾向が見られ、このことは、超高速光スイッチ動作としてこの超高速応答が有用であることを意味している。さらに、光カー信号についても、同様に先行の光パルスによる励起子密度の増加があっても、時間信号波形の形状への影響はほとんどないことを確認した。偏光回転光カーゲートスイッチの実験においては、0.8ピコ秒間隔の二連の連続パルスを使って信号を得ることに成功した。今後、励起子密度緩和と光スイッチ信号の関係についてさらに詳しく調べる必要があるが、複数準位の同時励起による超高速応答は光スイッチの新しい動作原理として重要であることを示すことができた。

(3-1-2) GaAs 閉じ込め励起子の縮退四光波混合信号

半導体ダブルヘテロ構造薄膜に弱く閉じ込められた励起子の非線形光学応答は、これまでの研究から、特定の膜厚で非線形光学応答が共鳴的に増大し且つ高速の応

答を示すことが示されている。この応答は励起子閉じ込めの 2 番目の準位が大きな寄与をしており、この準位に共鳴したピコ秒パルスによりその応答特性が調べられてきたが、前節で述べたように、より高速な応答について調べるため、フェムト秒レーザーによるサブピコ秒パルス励起における非線形光学応答を、時間分解およびスペクトル測定両面から観測した。

試料は、分子線エピタキシー法により GaAs 基板上に作製した GaAs/Al_{0.3}Ga_{0.7}As ダブルヘテロ構造のものである。

まず、3 ビーム入射による過渡回折法とよばれる手法により、励起子密度の時間変化測定を行った。その結果、スペクトル幅の広い 100 フェムト秒程度のパルス励起では 100 ピコ秒以上の遅い緩和を示し、応答のスペクトル形状はほぼ一定で常に 2 番目の準位で大きな強度を示すことがわかった。図 1.1 にその時間応答および信号のスペクトルを示す。以前測定されていたピコ秒パルス励起の場合の実験結果は励起子と輻射場の相互作用に基づく輻射緩和に起因する信号と考えられる数ピコ秒程度の信号幅を有するもので、この結果は、それと大きく異なっている。このため、励起パルス幅を変化させ、サブピコ秒からピコ秒にわたる様々な励起パルス幅に対して、応答信号を調べた。励起パルスのスペクトル幅を絞りスペクトル幅の狭いピコ秒パルスに近づけると、パルス幅程度の速い緩和によるピークが現れ、広いスペクトル幅による励起ではその信号が消失した。これは位相緩和が輻射緩和を上回り、コヒーレントな輻射緩和が阻害される可能性を示唆しているものと思われる。一方、いわゆる通常の 2 ビーム入射の縮退四光波混合信号 (Degenerate four-wave-mixing: DFWM) の自己回折信号では、パルス幅程度の超高速応答が得られた。信号のスペクトル測定からはいずれも励起子の 2 番目の準位からの寄与が支配的であることが確認できた。

複数の励起子状態を同時励起する超短パルス励起の場合はピコ秒パルス励起とは異なった新たなダイナミクスがあるものと考えられ、これを調べるため、非線形信号の強度と時間応答の励起パルスのスペクトル幅や励起エネルギー依存性を測定し

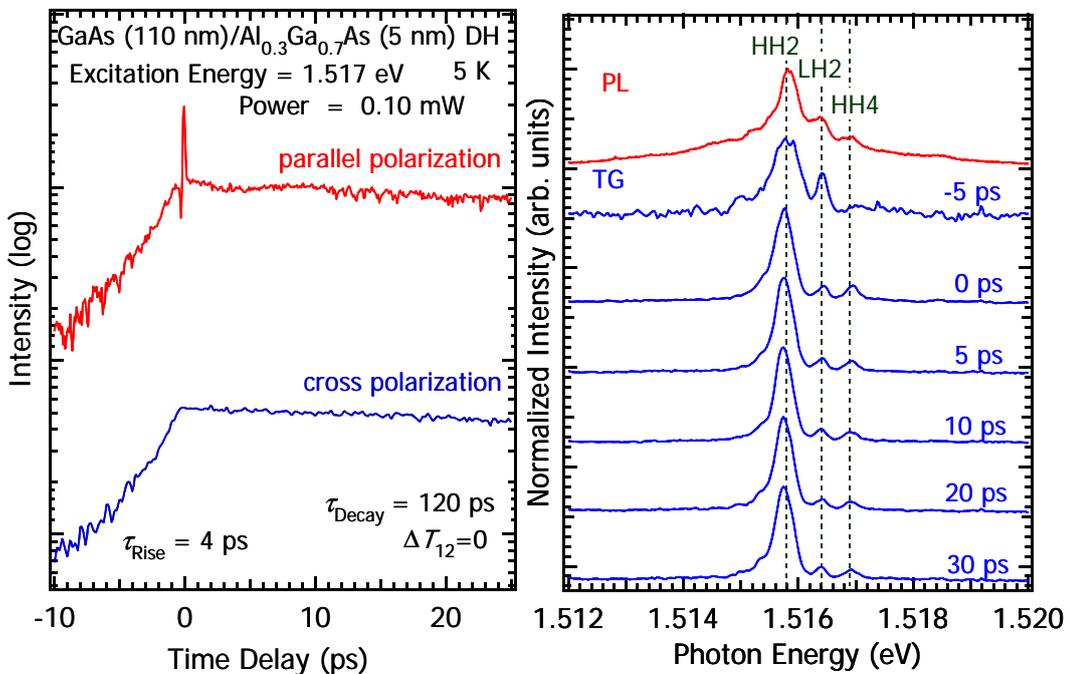


図1.1 過渡回折信号の時間応答とそのスペクトル

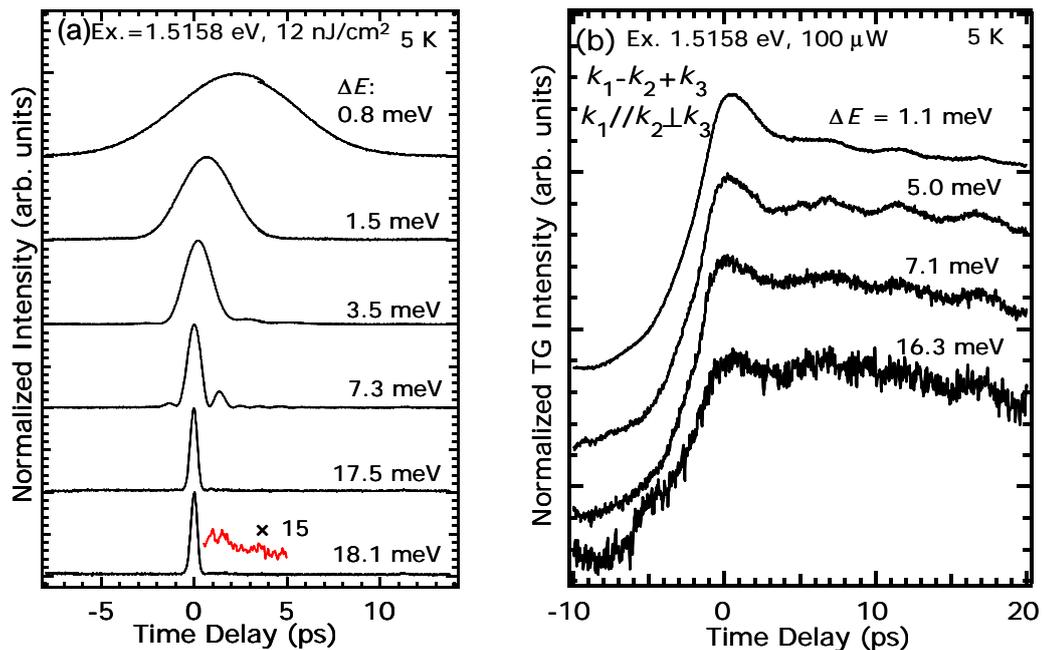


図1.2 様々なパルス幅で測定した縮退四光波混合信号(a)自己回折信号(b)過渡回折信号

た。図 1.2 は DFWM の自己回折信号と過渡回折信号をさまざまな励起スペクトル幅のパルス励起に対して示したものである。 $E=0.8$ meV の場合、ほぼ単一の励起子準位のみを励起しているため、この信号を単一の弱閉じ込め励起子の応答とみなすことができる。スペクトル幅を広げていく、すなわちパルス幅を短くしていくと、時間原点付近にパルス幅程度の超高速応答と振動構造が出現している。この超高速応答は、従来の非局所応答理論から得られる応答速度をはるかに上回っており、 $E > 1.5$ meV で出現するこれらの現象は、弱閉じ込め励起子の応答速度そのものが変化するのではなく、複数の励起子準位励起により生じているもので、単一励起子準位のみでの応答では不可能な超高速応答が誘起されたものと推測される。

このことを確認するため、自己回折信号のスペクトルおよび励起光エネルギー依存性について観測した。図 1.3 は励起パルスのスペクトル幅を一定 (5.6 meV) にして、その中心エネルギーを変化させたときの自己回折信号である。またスペクトル幅を 10 meV に広げたときの信号のスペクトルも示した。励起パルスのエネルギーを上げると信号強度に振動構造が見られる。これは高い準位を同時に励起することによる量子ビートであり、その振動周期は励起子準位間のエネルギー差に一致して励起エネルギーが高くなるにつれ、高い準位が励起されるため、振動数が大きくなっている。この信号の包絡線の傾きはほぼ一定で約 1.6 ps の時定数であり、これは位相緩和による時定数を示すものと考えられる。以上のことから、自己回折信号の超高速信号は複数の励起子準位の同時励起による準位間の干渉効果により生じていることが明らかとなった。

励起子の緩和ダイナミクスを明らかにするため、さらに 3 ビーム入射の縮退四光波混合において励起パルスの偏光を互いに直交した配置でおこなう配向緩和測定を行った。その結果、図 1.4 に示すように配向緩和信号は自己回折信号と同様な超高速応答特性を示すことを観測した。配向緩和は非線形効果の偏光依存性の緩和を表すものであり、このことは、偏光回転光カーゲート信号が、励起パルス幅と同程度の超高速応答特性を持つことを推測させるものである。

したがって、複数準位励起によりサブピコ秒の応答を持つ光スイッチの可能性があることを明らかにできたといえる。

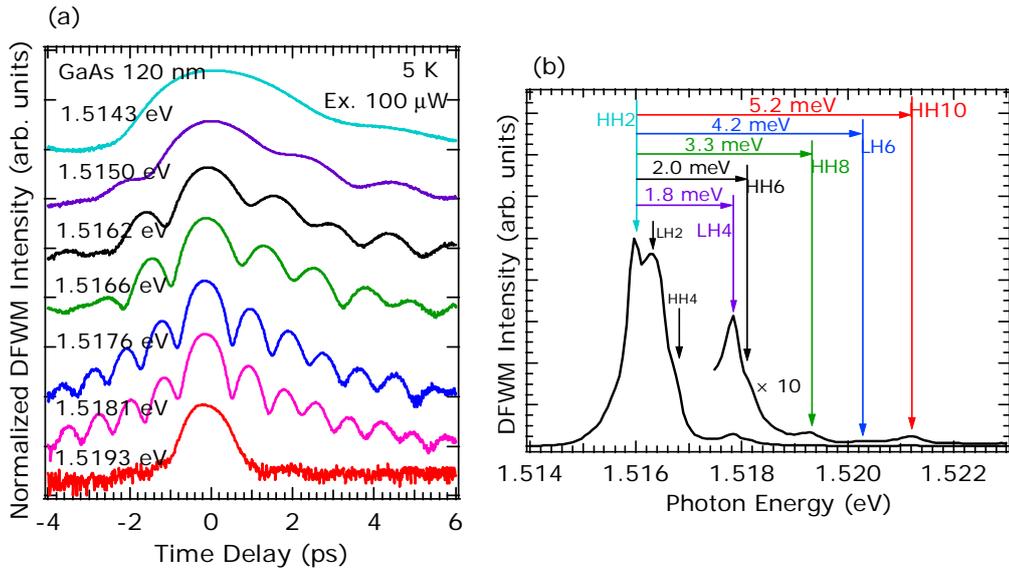


図1.3 自己回折信号の励起エネルギー依存性とそのスペクトル

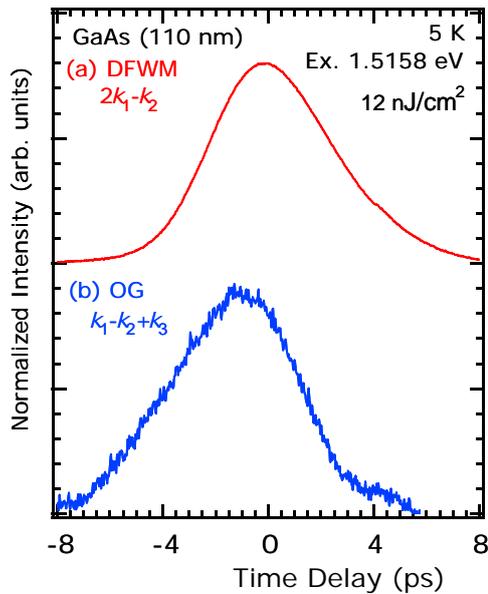


図1.4 DFWM自己回折信号と配向緩和信号

(3-1-3) 時間分解フォトルミネッセンスによる励起子寿命測定

前節で述べたように、過渡回折法による励起子密度回折格子の緩和は 100 ピコ秒以上の長い緩和時間を示した。励起子密度の時間応答をより詳細に調べるため、一般によく行われている手法であるフォトルミネッセンス発光の時間分解測定を行った。まず、励起波長を発光のピーク付近でわずかに変えながら発光強度の時間変化を測定した。図 1.5(a)に繰り返し 80MHz による測定の結果と発光スペクトルを示した。

検出と同じ 1.515eV の共鳴励起では時間原点付近にピークを持ちその後ゆっくりとした緩和があり、励起エネルギーが 1.52eV 以上に大きくなるとゆっくりとした立ち上がり時間がみられ、その後遅い緩和を示した。なお、共鳴励起の場合の原点付近のピークについては測定の時間分解能に近い幅であるため、励起パルスの散乱光は十分に取り除いた測定系としているものの、その影響の可能性もあり、本結果が

らの詳細な議論は困難である。ゆっくりとした緩和は、この測定からは、いずれの励起エネルギーに対しても数 ns 以上であることが明らかとなった。

遅い緩和の緩和時間を見積もるため繰り返し 4 MHz での測定を行った結果を図 1.5 (b) に示した。測定の時間分解能の関係で共鳴励起でも原点付近の速い緩和は見られないが、いずれの場合も遅い緩和時間として約 14 ns 程度の緩和時間が得られた。このような長い緩和時間は、試料の GaAs 膜が高品質であることを示しているものと考えられる。一方非共鳴励起における約 200 ps の立ち上がり時間は、連続状態準位の電子正孔対の励起から閉じ込め励起子準位へのエネルギー緩和に要する時間と解釈することができ、弱閉じ込め励起子系特有の現象ではないかと思われる。

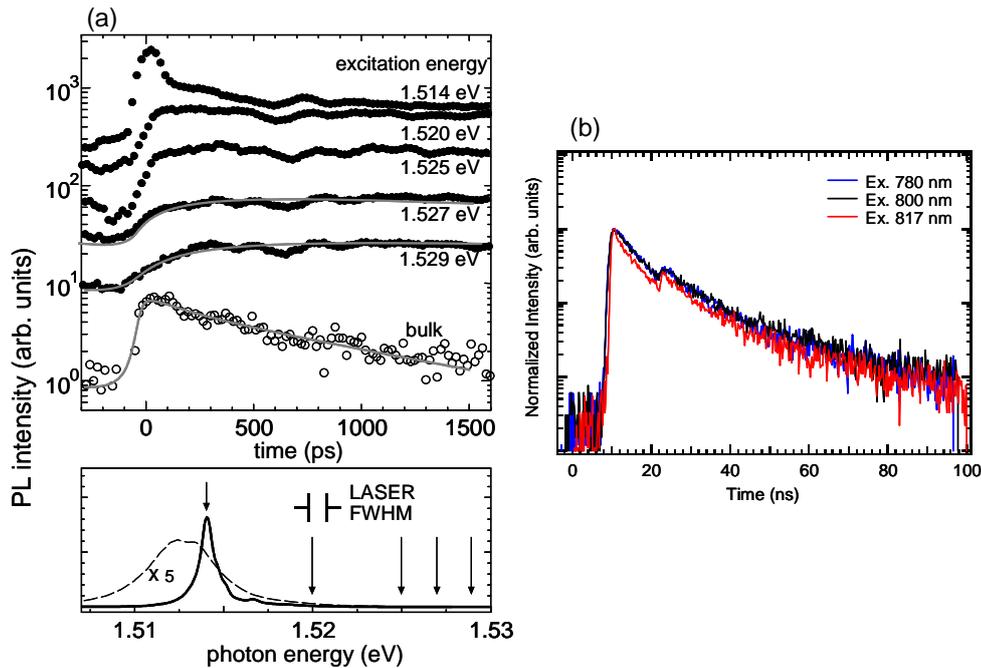


図1.5 (a)時間分解PL強度とPLスペクトル (b)繰り返し4MHz による時間分解PL

(3-1-4) 残留励起子密度による効果

前節までに、弱閉じ込め励起子の複数の励起子準位を同時に励起することで、各準位からの非線形信号の重ね合わせにより非線形光学応答強度が増加し、準位間の干渉によりパルス幅程度の超高速応答が得られること、および、光パルスにより励起された励起子密度の 10 ns 以上に及ぶ長い寿命について述べた。この非線形光学応答に対する残留励起子の効果について調べた。通常の 2 ビームの縮退四光波混合 (DFWM) 法に、残留キャリアを生成するためのパルス (プレパルス) を異なる方向から入射し、励起子の非線形光学応答を、5 K で測定した。

図 1.6 は、プレパルスの入射時間を変えて DFWM 信号を測定した結果である。入射パルスのスペクトル幅は 0.9 meV から 16 meV と変化させた。(a) は時間形状を示したもので、そのそれぞれの一番上の破線で示したプロファイルは、プレパルスがない条件での DFWM 信号である。プレパルスを励起パルスの 50 ps 前 (-50 ps) および 50 ps 後 (+50 ps) に入射した際のプロファイルを示している。パルス幅程度の高速応答は、前節で述べたように複数の励起子準位が励起されることに起因している。(b) は時間原点付近での最大信号強度のプレパルスの入射時間依存性を示したものである。プレパルスの入射により信号の最大強度は低下し、その低下量はプレパルスの入射時間に依存している。すなわち残留励起子密度に依存してい

ると考えられる。しかしながら、波形はほとんど変化しておらず、このことは、残留励起子密度は、信号強度を低下させるが、高速応答特性にはほとんど影響しないことを示している。 $\Delta E=0.9\text{meV}$ の時、強度低下が最も大きい、これはスペクトル線幅が狭いため同じパワーで励起した際に、より有効的に励起子が生成されることによるものと思われる。

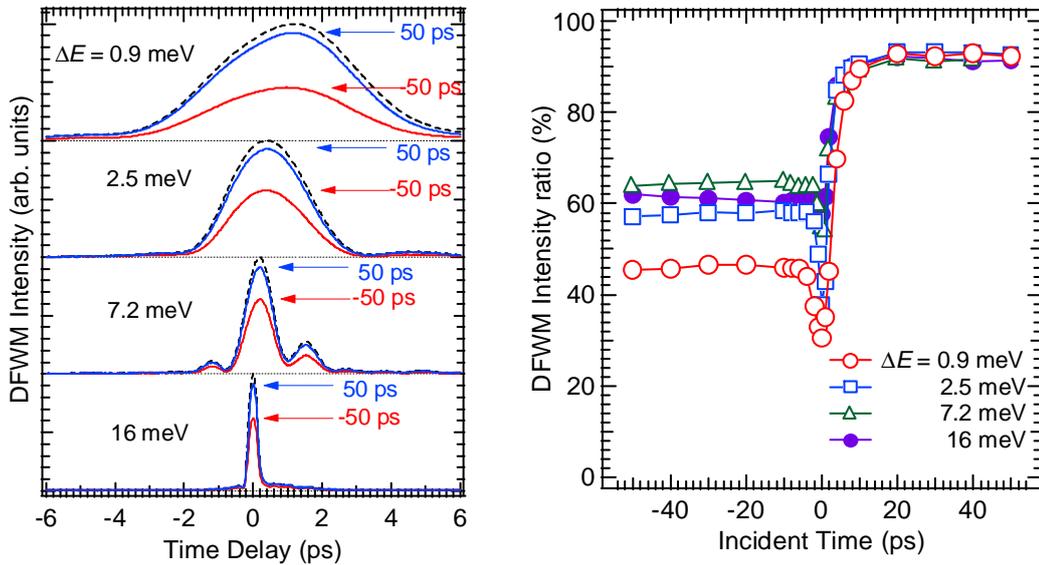


図1.6 (a) プレパルス入射時のDFWM信号 (b) DFWM信号強度のプレパルス入射時間依存性

(3-1-5) 融着による試料作製

活性層周辺の環境層の光学的構造を制御するための半導体試料の融着による構造作製の技術開発においては、GaAs ダブルヘテロ構造の試料作製と GaAs/AlAs あるいは AlGaAs/AlAs の多層 DBR 膜の MBE による作製、およびそのウエハ融着による試料作製を進めた。図 1.7 は GaAs ダブルヘテロ構造 3 層の活性層と AlGaAs/AlAsDBR 層を融着後、活性層側の基板をエッチング除去した試料の反射スペクトルと PL スペクトルを示したものである。右側の図は活性層の融着前後の PL スペクトル強度を示したものである。この試料では反射スペクトルのピークと活性層の発光ピークの一致が十分ではないものの、融着後の試料が大きな強度を持つことがわかる。これは活性層の光学特性を劣化させずに融着できることが確認できたといえる。融着プロセス時に生じるウエハ破損をなくすことや、基板除去のエッチング時に生じる表面荒れをなくすなど今後作製プロセスにおける解決すべき点は残るものの、ダブルヘテロ構造の活性層の光学特性を劣化させずに融着できることを確認した。今後、プロセスの正確な制御と適正な条件を求め、より大きな非線形光学応答を得ることが期待できる DBR 構造との組み合わせ構造作製など様々な構造作製への適用が期待できる。

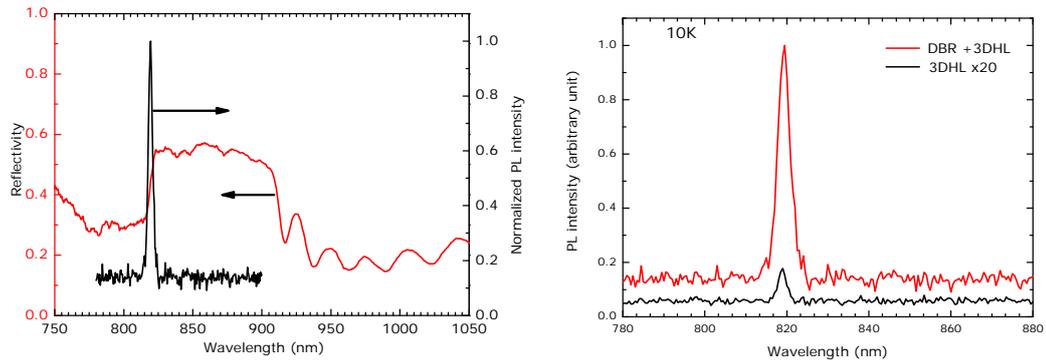


図 1.7 (a) 反射スペクトルと PL スペクトル (b) DBR 層融着前後の PL スペクトル

(3-1-6) 連続パルスによる偏光回転光カーゲート信号

全光スイッチ動作の検証を行うため、直線偏光のポンプ光・プローブ光を用いたポンプ - プローブ法による時間分解光カー効果の測定を行った。励起レーザーのパルス幅を変化させ光カー効果によるプローブ光偏光の垂直成分信号の時間応答を観測した。その結果、入射パルス時間幅に相当した光応答が観測された。その結果を図 1.8 に示す。フェムト秒レーザーからの直接のパルス入射時にはサブピコ秒の超高速応答が観測され、信号の減衰曲線から 170fs 程度の減衰時定数を持つ信号ピークが得られた。これはテラビット級超高速全光スイッチへの応用が期待されるものである。これらの信号は、DFWMの自己回折信号や配向緩和信号などとその特徴が類似しており、複数の励起子準位の同時励起による干渉効果のため、パルス幅程度の超高速信号が得られているものと推測される。

実際の光スイッチにおいては制御パルスが多連で入力される。そのため残留励起子密度の効果が生じると考えられる。ポンプ光としてピコ秒 2 連パルス入射を行うことで、その励起子残留密度が光カー効果に及ぼす影響を調べた。具体的には第 2 パルスの遅延時間を変化させ、第 1 パルスに対する光カー応答の変化を観測した。その結果を図 1.9 に示した。時間プロファイルにパルス幅程度の高速応答が現れ、また、2 連パルス入射時もプロファイル形状が変化していないことがわかる。第 2 パルスを先行入射すると光カー信号強度が 60%程度に減少したが、時間プロファイルの変化は見られずパルス幅程度の高速応答が観測されている。この結果は DFWM 信号の場合とほぼ同じ特徴を示すもので、励起子密度の残留による効果と考えられる。

光カースイッチ動作のデモンストレーションとして、2 連ピコ秒パルスを用いた場合の光カーゲート信号の観測を行った。その結果を図 1.10 に示す。それぞれのポンプパルスに対して半値幅約 300fs の信号が得られており、パルス間隔 800fs の二連続パルス入力に対して、それぞれに対応する明瞭に分離した信号が得られた。このパルス間隔は 1.25 Tbps の信号に相当するもので、この結果は、超高速での光カーゲートスイッチ動作の原理検証を確認したものと見える。

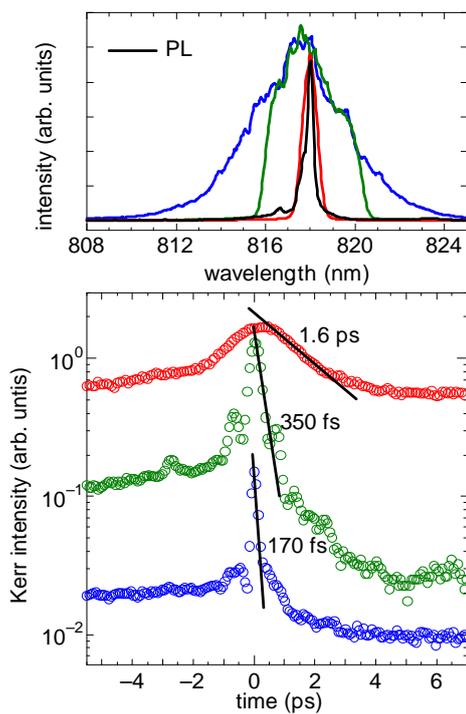


図1.8 異なる入射パルス幅に対する光カー信号の時間プロファイル。上図はスペクトルを示す。

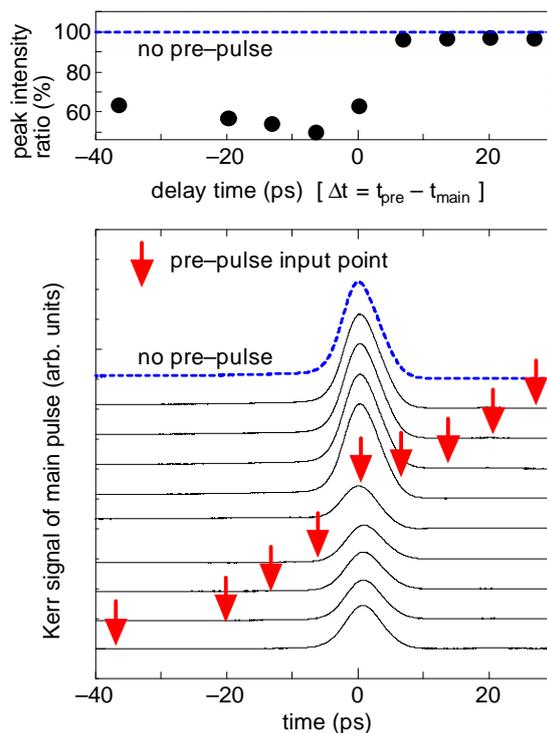


図1.9 2 連入射パルスに対する光カー信号の時間プロファイル。上図はピーク強度を示す。下図中の矢印は第2 ポンプパルスの入射時間を示す。

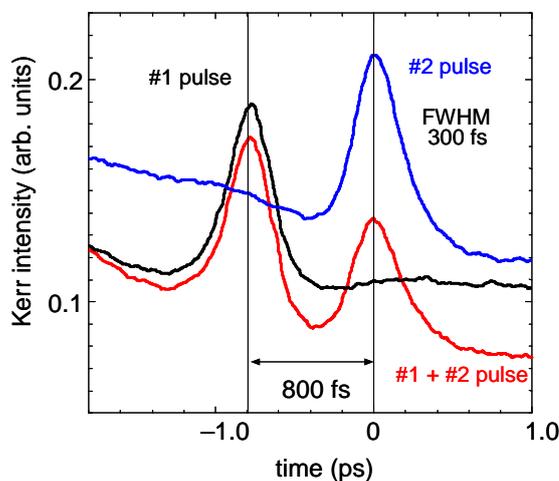


図1.10 2 連サブピコ秒パルスに対する光カー信号

(3-1-7) まとめ

本研究ではGaAsダブルヘテロ構造薄膜における弱閉じ込め励起子の非線形光学応答特性が構造によって大きく制御できる特徴を利用して、新しい動作原理の超高速光スイッチを開発することを目指した。弱閉じ込め励起子の非線形光学応答を時間と波長の両面から詳しく調べた例はこれまでになく、GaAsダブルヘテロ構造薄膜に

において弱閉じ込め励起子の非線形光学応答特性の詳細を初めて実験的に観測評価した。その結果、ピコ秒パルスで単一の励起子状態を励起した場合と、サブピコ秒パルスで複数の励起子状態を励起した場合では異なった応答が生じるが、スペクトル的にはいずれの場合も、理論の予測どおり 2 番目の励起子準位からの応答信号がもっとも支配的であることを明らかにした。さらに、サブピコ秒パルス励起の場合には複数の励起子準位が関与することによりその干渉効果によって、単一状態の緩和時間に律速されない超高速応答が得られるということを示した。また、超高速応答を実現するためのサブピコ秒のパルス励起では、高い励起子準位(連続準位)を同時に励起するため、GaAs においては 10ns を超える長寿命の励起子を生成することが明らかとなったが、縮退四光波混合信号などはこの長寿命の残留励起子があっても超高速応答を示すことを確認した。偏光回転光カーゲート信号においても同様な超高速応答が得られ、連続パルスに対する応答特性測定にて、1.25 Tbps に相当する超高速応答信号を得ることに成功した。これらはいずれも当該分野における最初の成果である。

(2)研究成果の今後期待される効果

ナノスケールの半導体薄膜における電子系との相互作用により生じる内部光電場のナノ空間構造を制御することにより、高い非線形性、超高速性を有する新しい高機能な超高速光スイッチを創製することを目指してきた。具体的には、MBE 法により作製した GaAs 系化合物半導体多層薄膜構造により、弱閉じ込め励起子の非線形光学応答特性の詳細を実験的に明らかにし、光カーゲートスイッチの動作検証を行った。

弱閉じ込め励起子の緩和過程の詳細を明らかにしていく過程で、サブピコ秒レベルの超高速性を得るためには、幅広いスペクトル領域を考慮することが必要であり、多準位間の干渉効果を取り入れるなどした、動作原理が重要であることを見出した。このことは、今後、より実用的な超高速光スイッチを開発する上で、よく理解すべき点であり、様々な研究の端緒となるものと考えられる。

今後の研究展開としては、まずは、残留励起子密度による非線形応答強度への影響についてさらに解明するとともに、その影響の削減方法を見出すことが必要である。また、さらに多連のパルス列を用いた場合の応答信号を測定し、光スイッチとしてのさまざまな特性を評価していくことや、四光波混合信号等の実時間波形とそのスペクトル変化(チャージング)などを明らかにしていくことも重要である。これらの研究は残期間に継続して行う予定としている。

また本研究を進める中で、ナノ構造における非線形光学応答の大きな光学異方性も応用上で重要な特性であることがわかった。特に、面型の光デバイスを開発する上で、面内の光学異方性の詳細な特性を明らかにし、応用を検討することは重要な課題であると考えられる。新たな多機能な超高速光スイッチを実現する上でも、またデバイスの集積化を進める上でも、面型の光デバイスは優位であり、その可能性を示したことから、今後、面型光デバイスの研究が広がりを見せるものと思われる。

また、閉じ込めの励起子については単層薄膜だけでなく、結合量子井戸膜や、結合量子ドット鎖など、励起子系のエネルギーをも構造によって制御できる系での非線形光学応答を利用することを考えていくことも重要であると思われる。様々な系における研究に影響を与えるものと思われる。

これらの研究の発展により、非線形光学応答特性を明らかにすることで、適正なデバイス構造が確立し、大容量・超高速の光通信技術に必要な革新的な次世代光デバイスが実現するものと期待される。

3.2 新現象・新材料探索（大阪大学 伊藤グループ）

(1)研究実施内容及び成果

(3-2-1)CuCl 薄膜における超高速応答

ナノ空間における電子と光が織りなす様々な新奇現象を探ることを目的に、ナノ構造物質を中心に、種々の分光法を駆使して実験的研究を行った。特に、電子と正孔の結合状態である励起子の光学応答に注目し、光と励起子の相互作用が大きく、エネルギー準位構造が単純であるワイドギャップ半導体 CuCl を取り上げた。

最初に、理論グループによって、感受率と内部電場の二重共鳴による非線形光学応答増強が非常に顕著に観測されると予想されている CuCl 超平坦薄膜における非線形光学応答の評価に関して述べる。

半導体材料における高速光学応答と強い光学非線形性は光スイッチデバイスの性能向上に不可欠な要素であるにも関わらず、その両立は困難であるとされてきた。その中で、半導体ナノ構造は高速かつ高効率な非線形光学応答の実現への有力な候補の一つとして注目されている。特に、量子構造を工夫することではなく、単純な薄膜であっても、特別な条件下では新奇光学応答が得られることが理論的に予測された。すなわち、最低電子励起状態である励起子に共鳴する光を照射すると、物質内部ではナノスケールの空間構造を持つ光と励起子波動関数が複数波長に及んで重なり合い、両者に極めて強い結合状態が得られるというものである。例えば、典型的な非線形光学過程の一つである縮退四光波混合の強度や応答時間が長波長近似を超えた非単調なサイズ依存性を示すため、適切なサイズを選択することにより、超高速応答を伴う非線形信号の共鳴増大が期待されている。我々は、CuCl のナノ薄膜における縮退四光波混合測定を過渡回折格子配置で行った。

図2.1(a) は膜厚268nmの場合の縮退四光波混合による過渡回折光(TG)のスペクトルである。バルク結晶の場合と異なり、複数の構造が現れたが、それぞれのピークエネルギーが理論計算によって得られる励起子・輻射場結合系の固有エネルギー(図2.1(b))と一致しており、ナノ領域特有の巨大な輻射シフトを非線形信号において観測することに初めて成功した。また、入射光の一つに時間遅延をつけた場合のTG強度変化を測定した結果、図2.2に示したように $n = 3$ のモードに相当する成分が100 fs 以下の極めて速い減衰を示した。これは、 $n = 1, 2$ のモードとの干渉による量子ビート構造の影響もあるが、主として図2.1 (c) に示した数 meV にも及ぶ大きな輻射幅を反映した励起子の超高速輻射緩和によるものと考えられる。他の膜厚の場合も、同様のスペクトル構造、超高速緩和が観測され、理論と良い一致を示した。

以上のように、CuCl ナノ薄膜において過渡回折光スペクトルやその応答速度が励起子・輻射場結合系における各モードの固有エネルギー、輻射幅と精度良く一致することが示さ

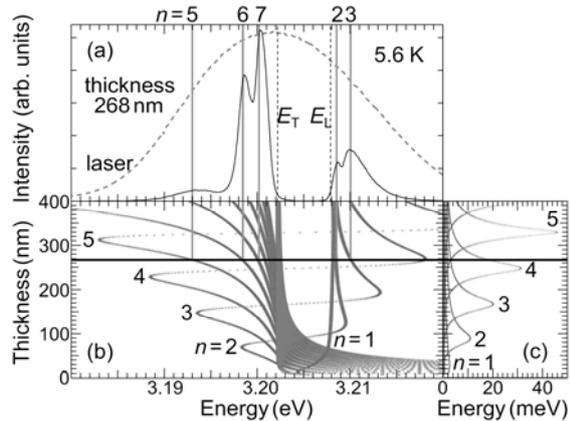


図 2.1 TG スペクトルと固有モード

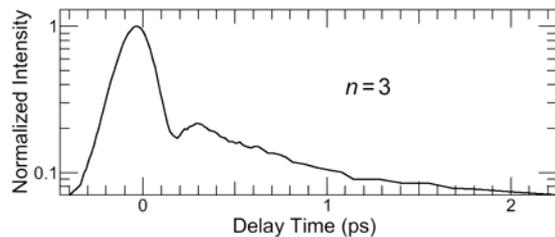


図 2.2 TG 信号強度の遅延時間依存性

れた。従って、図2.1(c)の計算によれば、膜厚、励起波長の最適化によって、数10 fs 程度の超高速輻射緩和が実現できるものと予想される。

なお、上記の実験において、表面の平坦性が良い薄膜を用いている。このため、励起子がコヒーレンスを乱される非輻射遷移の影響を受けることなく、本来の性質を現した。その作製には、分子線エピタクシー法を用いたが、成長の初期段階で電子線を照射することによって平坦性を著しく高めることに成功した。図 2.3 にその様子を示す。

一方、CuCl 薄膜の実用に関しても重要な成果が得られた。CuCl は空気中の水分などと反応して容易に劣化する。このため、表面に CaF₂ をコートする技術の開発を行った。その結果、光学特性を損なわずに CaF₂ キャップ層を加えることに成功し、膜の耐久性を著しく向上させることに成功した。

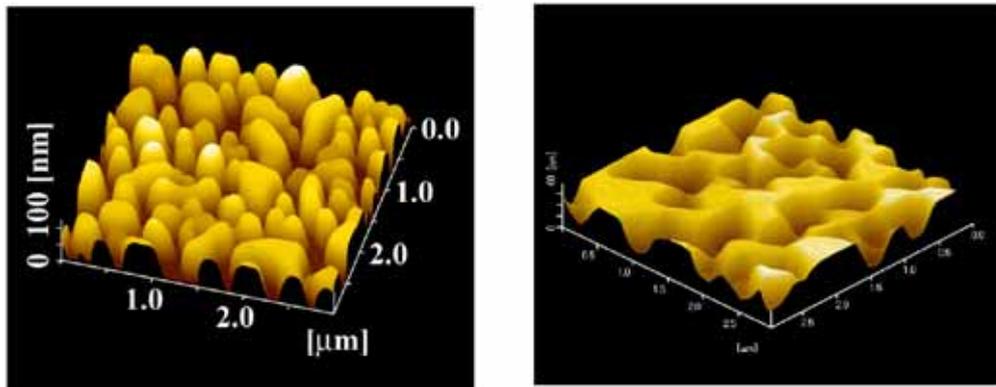


図 2.3 薄膜作製における電子線照射効果 電子線照射なし（左）電子線照射有（右）

(3-2-2) CuCl 量子ドットにおける超放射現象

次に、CuCl 量子ドットに関連した成果について述べる。

我々は、NaCl 単結晶に担持した CuCl 量子ドットにおいて、励起子が2個結合した状態である励起子分子を、バルク結晶においてと同様に二光子共鳴励起することが可能であることを世界に先駆けて明らかにした。図 2.4 にその概念図を示す。励起子2個が衝突して励起子分子を生じる過程とは異なり、緑太矢印で示すように2個の光子を同時に吸収して励起子分子状態を形成する。本プロジェクトでさらに研究を進め、この手法を適用することによって、一光子励起に対して桁違いに閾値が低い、非常に高効率なレーザー発振、あるいは超蛍光などの新奇現象が起こることを発見してきた。以下では超蛍光現象に絞って記述する。

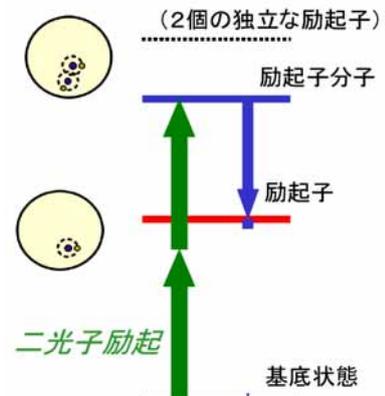


図 2.4 励起子・励起子分子のエネルギー準位図

超蛍光とは、多数の励起状態にある二準位系が起こす集団的な自然放射であり、通常の発光現象とは異なって、発光の時間波形がパルス形状を持つことが特徴である。この現象は Dicke によってレーザーの発明以前に予想され、量子光学の基本現象として、主として原子・分子系で研究されてきた。最近では、超蛍光を示す励起状態は量子情報処理技術へ応用できることが理論的に明らかとなっており、新たな興味を呼んでいる。超蛍光の実現には、個々の二準位系が波長より近距離に存在することや長い位相緩和時間などが必要であり、特別な気体原子・分子や固体に埋め込まれた分子についてのみ実験が行われていた。しかしながら我々は、量子ドットは高

密度化が容易であること、長い位相緩和時間を持つことから、超蛍光を実現するのに理想的な系であると捉えた。

超蛍光の理想的な発現条件は、二準位系が完全反転分布していることである。我々は、量子ドット中の励起子分子を二光子共鳴励起によって励起子状態を介さず直接生成することにより、図 2.4 の青矢印で示すように励起子分子と励起子状態間に完全反転分布を形成し、その結果、励起子分子による超蛍光が起こると考えた。但し、量子ドットの場合は発光寿命が原子・分子系に比して短く、超蛍光の時間応答は ps 程度以下である可能性がある。そこで、カーゲート法と呼ばれる実験手法を用いて、100fs の時間分解能で二光子共鳴励起下における励起子分子発光の時間応答を測定した。励起レーザーのスペクトルは図 2.5 上図に示す通りで、エネルギーは励起子分子の二光子共鳴励起に対応する。図 2.5 下

図に、15K における励起子分子二光子共鳴励起下での時間分解発光スペクトルを示す。上図の時間積分スペクトルで顕著に観測される自由励起子分子発光 (M)、束縛励起子分子発光 (BM) が立ち上がる前に、下図に点線で示したパルス状の発光 (FM) が観測された。FM 発光は二光子共鳴励起下でのみ現れ、その時間波形の励起強度依存性は、超蛍光が持つ性質と良く一致しており、半導体量子ドットにおいて、超蛍光を初めて明瞭に観測できたと考えられる。そのパルス幅は 200fs 以下に至る場合もあり、これまでに報告されてきた ns 程度の時間幅より格段に速い応答が量子ドットによる超蛍光の大きな特徴である。この現象を超高速波形整形に適用するなどの応用も考えられる。

(3-2-3) 光マニピュレーション

最後に、量子ドットの新奇作製法の開発に関して述べる。超流動ヘリウム中でバルク CuCl 結晶のレーザーアブレーションを行い、nm オーダーから数百 μm 程度までの様々な大きさの CuCl 微粒子が生成できることを見出した。NaCl 単結晶に担持した CuCl 量子ドットの場合、周囲の結晶構造を反映して直方体状になってしまうが、自由空間に近いと考えられるヘリウム中では、球形をした量子ドットを得ることに成功した。図 2.6 に、生成した量子ドットの透過電子顕微鏡像を示す。格子縞が観測できていることから、結晶性が高いことがわかる。また、この格子縞の間隔から求めた格子定数は、バルク CuCl と良い一致を示した。ヘリウムは化学活性が低く、CuCl と化合しないこと、また、レーザー照射直後の高温表面ではヘリウムが気化し、CuCl が急冷を免れることで、ガス中蒸発法における微粒子成長のように、高品質な量子ドットの作製が可能になったものと考えられる。

こうしたアブレーションによる微粒子作製は、CuCl に限らず、あらゆる物質のナノサイズ化を図れる点で興味深い。が、粒径サイズの制御が困難

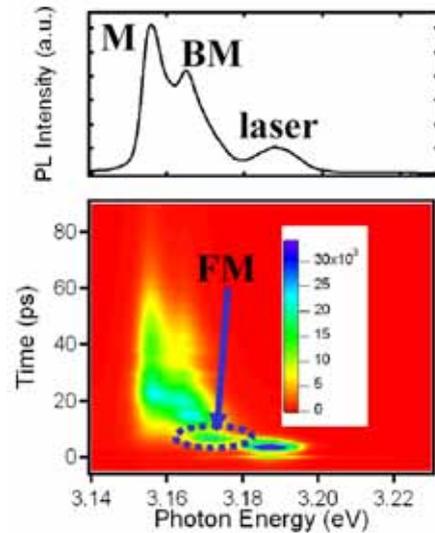


図 2.5 励起子分子発光の時間積分 (上図) 及び時間分解スペクトル (下図) 強度を色に対応させている。

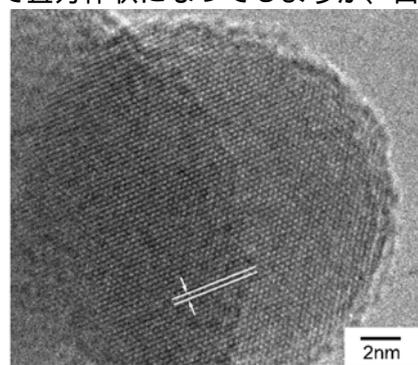


図 2.6 レーザーアブレーションにより作製した量子ドットの高分解能透過電子顕微鏡像

である。そこで、理論グループの提案を実験的に確かめること、すなわち光マニピュレーションによる量子ドットのサイズ選択等を実現し、高コヒーレンス材料創成のための新奇ナノ構造作製法としての確立を目指している。超流動ヘリウムは2K程度の極低温であるため量子ドットの励起子共鳴準位の幅が狭くなる、さらに粘性も小さい、などマニピュレーションの環境場としても最適である。こうした実験は世界で初めての試みであり、装置の開発から手がけることとなった。図2.7に実験系の概略を示す。上図に示す通り、ヘリウムクライオスタット内にサンプルホルダーを設置し、Nd:YAG レーザーの二倍高調波でCuCl パルク試料に

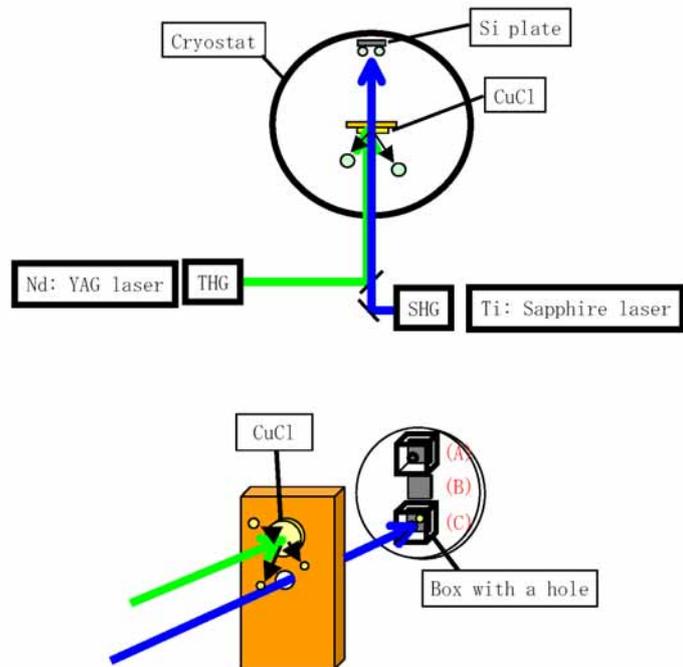


図 2.7 超流動ヘリウム中におけるレーザーアブレーションと光マニピュレーション実験の概略図 上から見たところ（上図）、クライオスタット内のサンプルホルダーと窓の部分拡大したところ（下図） 緑矢印はアブレーション用レーザー、青色矢印はマニピュレーション用レーザーを表す。

対してレーザーアブレーションを行って、超流動ヘリウム中で微粒子を生成する。さらに、作製したCuCl量子ドットに、Ti:Sapphireレーザーの二倍高調波をマニピュレーション光として照射することにより、特定のサイズ領域の微粒子のみに輻射力を及ぼし、サンプルホルダー付近から移動させることを試みた。その様子は図2.7下図に描いた通り、クライオスタットの窓にSi基板を取り付け、その表面に微粒子を付着させるという配置である。比較のため、マニピュレーション光を入射しない基板(A)、(B)も用意した。前者とマニピュレーションのターゲットである基板(C)には小さな孔を開けた箱を被せることで、クライオスタット内に浮遊するゴミの影響を取り除いた。ここで、サンプルホルダーから窓までの距離は1cm程度であった。

実験結果を図2.8に示す。左下側はサンプルホルダー直下に設置したSi基板を外部に取り出した後、走査型電子顕微鏡で表面を観察した結果であり、左上のヒストグラムは画像解析から求めた粒径分布である。なお、顕微鏡の空間分解能により粒径が10nm以下の微粒子は観測できないため、そのサイズ付近の個数は実際よりかなり少なく評価されている。粒径分布は数nmから300nm程度に亘っており、非常に広いことがわかる。この集団にマニピュレーション光を照射した場合の基板(C)表面の結果を図2.8右に示してある。基板(A)上には粒子が殆ど観測されなかった。また、基板(B)上には様々な粒径の微粒子が見られた。これらに対し、基板(C)上には粒径の揃った微粒子が観測された。その粒径分布が示す通り、20-50nmの量子ドットのみが移動させられることがわかった。この結果は、半導体量子ドットの光マニピュレーションとしては初めてのものである。ここでは、移動させられる粒子の数を増やすため、スペクトル幅の広いフェムト秒レーザー光をマニピュレーションに用いたが、さらに狭い線幅のレーザーを使用することにより、サイズ分布を狭くすることも可能であると考えられる。

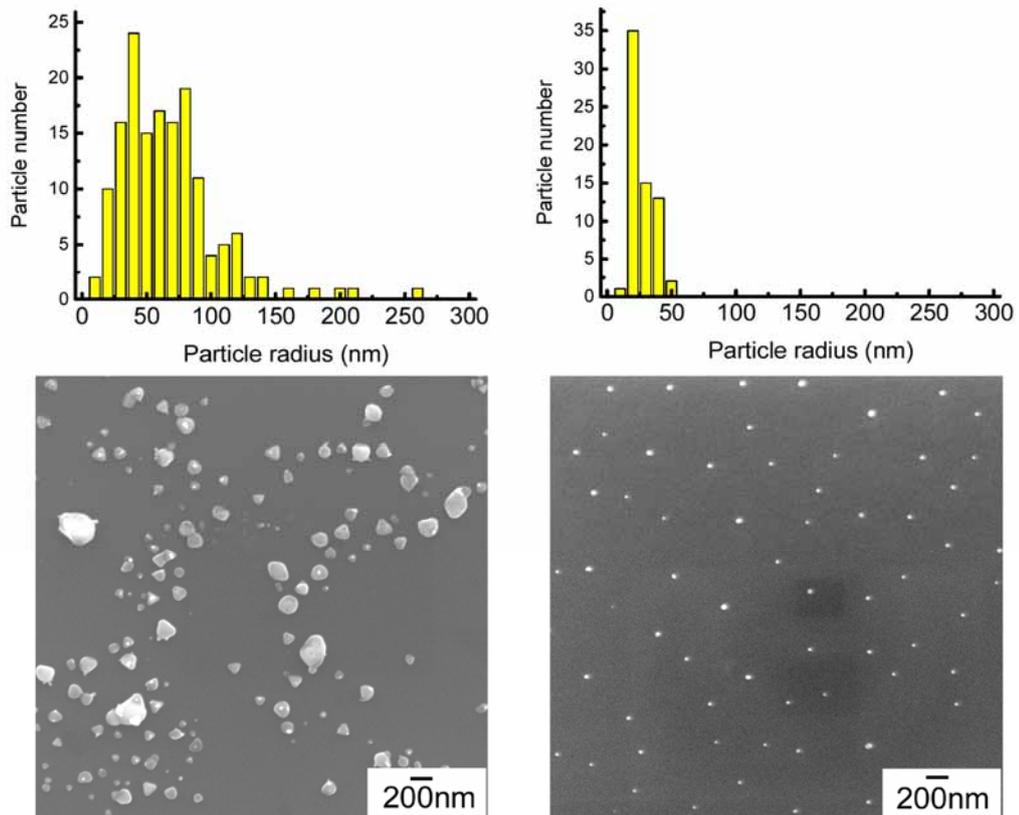


図 2.8 レーザーアブレーションで作製した微粒子の分布 (左上) と走査型電子顕微鏡像 (左下)。マニピュレーション光を照射した基板 (C) 上の微粒子の分布 (右上) と走査型電子顕微鏡像 (右下)。

(2) 研究成果の今後期待される効果

本研究では理想的な励起子系として、CuCl の薄膜、量子ドットを対象として研究を進めたが、その成果を他の物質系、特にワイドギャップ半導体 ZnO, GaN などに適用することにより、新奇デバイス創成に展開することができるものと期待される。

まず、薄膜の超高速非線形光学応答に関しては、その超高速輻射緩和を活かして、超高速光スイッチへの応用が考えられる。従来、物質の共鳴を使えば大きな非線形性が得られることは知られていたが、生成される励起状態の寿命が長いことが問題となっていた。超高速輻射緩和はこれを解決するものである。

一方、量子ドット集団からの超放射に関しては、これまで原子・分子系を対象が限定されていた超放射現象の基礎的理解、すなわち光励起状態における協力現象の解明などに資する他、絡み合った量子ドット集団として、量子情報技術への展開が期待できる。また、共振器なしにコヒーレントな光を生成できることも応用可能性を秘めており、光パルスの波長変換、波形整形などへの適用も考えられる。

最後に、超流動ヘリウム中におけるレーザーアブレーションと光マニピュレーションに関しては、新奇ナノ構造の創成とその選別、さらに配列への応用が期待される。理論研究と相俟ってナノサイエンスへの広範な応用が期待できるが、我々はこれを「光ナノファクトリー」と名付けている。

3.3 量子位相ゲートの開発 (東北大学 枝松グループ)

(1)研究実施内容及び成果

本研究では、量子計算機などを実現する際に必要となる量子ゲート(Controlled-NOT)を実現するための方法の一つとして有力視されている、制御光子の量子状態によって標的光子の位相状態が変化する素子、すなわち光量子位相ゲートを構築するための基礎技術の開発を行った。光量子位相ゲートを実現する素子材料として、上述のサブテーマで開発される超高効率固体光学非線形材料を想定し、その量子位相ゲートとしての動作実証を行うための基盤技術として、(1)半導体を用いた量子もつれ光源の開発、(2)パラメトリック下方変換を用いた新しい量子もつれ光源の開発、(3) 極少数光子による非線形位相シフトの計測方法の開発、を並行して行った。以下に各々の研究内容および成果について述べる。

(3-3-1) 半導体を用いた量子もつれ光源の開発

光子を利用した量子位相ゲート(光量子位相ゲート)の動作実証を行うためには二つの光子を時間的にも空間的にも一致するようにゲート操作を行う素子へ導く必要がある。そのため、時間的・空間的に相関をもつ量子もつれ光子の高効率な発生技術の開発は光量子位相ゲートの動作実証を行う上で重要なポイントとなる。本研究ではまず、量子位相ゲートの動作を実現する際の光源となる、量子もつれ光子対光源の開発を行った。

今日、量子もつれ光子対の発生方法として最も頻繁に用いられる方法は、パラメトリック下方変換と呼ばれる非線形光学過程である。この過程では、2次の非線形感受率を有する非線形光学結晶によって、入射光子1個が2個の光子に変換される。そこでは、エネルギーや波数ベクトルの保存(すなわち位相整合条件)が要請されることによって、発生した光子の間にエネルギー、時間、および空間的な量子もつれが生じるほか、量子情報通信技術で有用な偏光に関する量子もつれの生成も可能である。パラメトリック下方変換を用いると良質な量子もつれ光子対を比較的簡便に発生させることができるため、例えば量子テレポーテーションや量子もつれ抽出など、量子情報処理や量子情報通信に関連した様々な原理検証実験に用いられてきた。ただし、この過程で発生する光子対の各々の光子エネルギーは入射光子のそのほぼ半分になってしまうので、短波長領域での光子対発生は困難であり、今後の研究の展開が期待されている多光子間の量子もつれの生成や、量子リソグラフィ等への応用には適当ではない。また、将来の応用を考慮すると、電流励起が可能となる半導体を用いた量子もつれ光子対の開発も強く望まれる。これに対し、我々はハイパーパラメトリック散乱と呼ばれる3次の非線形光学過程に着目した。この過程では2個の入射光子を用いるため、入射光子とほぼ同じ光子エネルギーをもつ光子対の生成が可能である。ただし、一般に3次の非線形感受率の値は小さく、そのままではハイパーパラメトリック散乱は非常に効率が低い。そこで、入射光子のエネルギーと物質中の電子励起準位との共鳴を利用して効率の向上を図る等の工夫が必要となるが、半導体中の励起子分子状態と共鳴したハイパーパラメトリック散乱を用いることで、高い効率での量子もつれ光子の発生が可能である。また、この状態は励起子分子の角運動量を反映して、

$$\begin{aligned} |\Psi\rangle_{12} &= \frac{1}{\sqrt{2}} (|L\rangle_1 |R\rangle_2 + |R\rangle_1 |L\rangle_2) \\ &= \frac{1}{\sqrt{2}} (|H\rangle_1 |H\rangle_2 + |V\rangle_1 |V\rangle_2) \end{aligned} \quad (1)$$

で表される量子もつれ状態となることが予想される。ここで、 $|L\rangle_i$ 、 $|R\rangle_i$ 、 $|H\rangle_i$ 、 $|V\rangle_i$ は各々、放出された光子($i=1,2$)の左回り、右回りの円偏光および水平、垂直の直線偏光状態を表す。式(1)で表される2光子の偏光状態は、片方の光子の偏光だけを観測すると完全に無偏光であるが、対発生した2光子の偏光の間には完全な相関が保たれている。例えば、

片方が左(右)回り円偏光なら他方は右(左)回り円偏光、片方が水平(垂直)方向の直線偏光なら他方も水平(垂直)偏光となるのである。この量子もつれの発生メカニズムは、半導体中の電子励起状態における角運動量のもつれを光子に転写したものとみなすことができる。

これまで、このような半導体を用いて直接量子もつれ光子対を発生する試みは成功していなかったが、我々は、半導体の一種である塩化第一銅(CuCl)結晶にパルスレーザーを照射することによって励起子分子を2光子共鳴励起し、ハイパーパラメトリック散乱によって対生成される光子間の量子もつれを観測することに初めて成功した。CuClは励起子や励起子分子の性質がたいへん良く研究されている典型物質であり、2光子励起による

励起子分子の生成とハイパーパラメトリック散乱による光子放出過程についても多くの研究がある。我々の実験では、CuClの単結晶にモードロックチタンサファイアレーザー(パルス幅 ~ 2 ps)の第二高調波(390 nm)を照射することで励起子分子を生成し、その励起子分子が消滅する際に励起光に近い波長と方向をもって同時に放出される2個の光子を、偏光子、分光器および光電子増倍管からなる2組の検出装置で検出して、それらの間の時間相関と偏光相関を測定した。図3.1は、このようにして得られた2光子検出計数を光子間の時間差の関数としてヒストグラムで表したものである。ここでは、例として左回り(L)及び右回り(R)の円偏光と、水平(H)及び垂直(V)の直線偏光とを用いて偏光相関を観測した結果を示す。例えば、図3.1のLRまたはRLと記したヒストグラムにおいて、時間差が零($\tau=0$)の付近に強く表れる信号が、一つの励起子分子から発生する光子対の同時検出の結果である。従って、この信号の偏光相関に注目することで、発生した光子対の偏光に関する量子相関を議論することができる。一方、時間差が零の付近以外に現れるピークは独立な励起子分子から生成された光子が偶然に同時検出された結果であり、偏光の相関をもたない。これらのヒストグラムから明らかのように、円偏光で観測した時には互いに逆回りの円偏光(LRとRL)、直線偏光で観測したときには互いに平行な偏光(HHとVV)の組み合わせのときのみ同時検出信号が強く現れており、光子対の状態が式(1)から予想される偏光相関を明瞭に示していることがわかる。

量子もつれをさらに定量的に評価するためには、2光子の偏光状態に関する密度行列を求める必要がある。予想される量子もつれ状態(1)の密度行列はテンソル積 $|\Psi\rangle_{12}\langle\Psi|_{12}$ で表され、その対角成分は系に含まれる偏光状態の割合(population)を、非対角成分はそれらの間のコヒーレンスを表す。(1)のような理想的な量子もつれ状態では、偏光状態間のコヒーレンスが保たれており、密度行列の対角成分 $|H\rangle_1|H\rangle_2\langle H|_1\langle H|_2$ および $|V\rangle_1|V\rangle_2\langle V|_1\langle V|_2$ の項と非対角成分 $|H\rangle_1|H\rangle_2\langle V|_1\langle V|_2$ および $|V\rangle_1|V\rangle_2\langle H|_1\langle H|_2$ の項が同じ大きさ(1/2)をもつが、古典的な相関しか持たない状態(混合状態)の場合にはコ

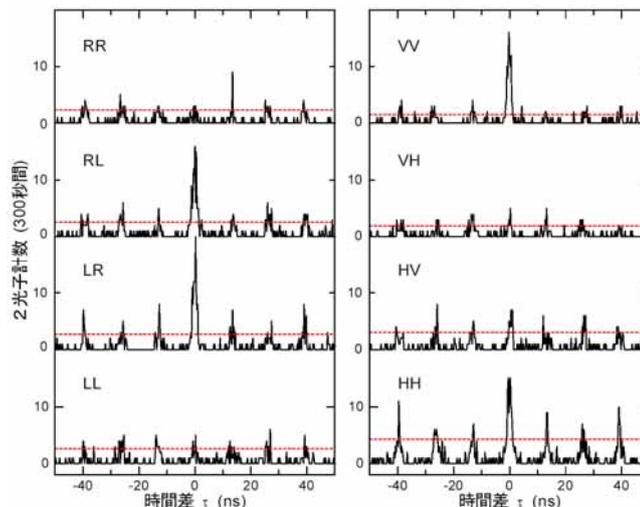


図3.1 発生した光子対の偏光相関の測定例。横軸は2光子の時間差、縦軸は2光子を検出した計数である。図中のRL、VH等の記号は、初めの文字が一方の光子の偏光方向、2番目の文字が他方の光子の偏光方向であり、R(L)が右(左)回り円偏光、V(H)が垂直(水平)方向の直線偏光を表す。互いに逆回りの円偏光(LRとRL)または互いに平行な直線偏光(HHとVV)の組み合わせのときのみ、 $\tau=0$ における同時検出信号が強く現れる。時間差 τ が0以外の時に観測されるピークは、異なる励起光パルス(13 ns 間隔)によって生じた別々の励起子分子から放出された光子間の偶然の2光子計数であり、点線はその平均値である。

ヒールズが失われ、非対角成分は0となってしまう。2光子の偏光に関する密度行列を実験的に求めるには、さまざまな偏光の組み合わせで偏光相関の測定を行い、量子トモグラフィと呼ばれる手法で密度行列を推定する。図 3.2 は、図 3.1 の結果を含む 22 通りの偏光相関の測定結果から推定した密度行列をヒストグラムで表したものである。その結果、上で予想したように、対角成分 $|H\rangle_1|H\rangle_2\langle H|_1\langle H|_2$ および $|V\rangle_1|V\rangle_2\langle V|_1\langle V|_2$ の項と非対角成分 $|H\rangle_1|H\rangle_2\langle V|_1\langle V|_2$ および $|V\rangle_1|V\rangle_2\langle H|_1\langle H|_2$ の項の値がほぼ 1/2 となり、予想される状態(1)にごく近い状態が実現されていることがわかる。さらに、この密度行列から理想的状態(1)に対する忠実度を評価した結果、92%という高い値が得られた。古典的には量子もつれの忠実度は 50%を超えることはないので、この結果は本研究で発生した光子対が古典限界を超えた高い量子もつれを有することを示している。このように、半導体中の励起子分子に共鳴したハイパーパラメトリック散乱によって、高い量子もつれを有する光子対を生成できることが実証された(特許第 3649408 号、PCT/JP2004/124716)(Nature 2004 等に掲載)。

しかしながら、上述の方法では偶然の2光子計数による信号がバックグラウンドとして本来の信号に混合し、人為的にバックグラウンドの減算処理をしない限り高い量子もつれは得られなかったため、実用的な量子もつれ光源として用いるには問題があった。そこで、繰り返しの高い(1 GHz)励起レーザーを用いることにより、偶然の同時計数を劇的に減少させ、人為的な処理無しに高い純度の量子もつれ光子を生成させることに成功した。その2光子偏光相関の実験結果を図 3.3 に示す。このようにして生成した量子もつれ光子対を用いて、Clauser-Horne-Shimony-Holt (CHSH)タイプの Bell の不等式の破れの検証実験を行った結果、Sパラメータとして局所实在論に基づく古典的限界である2を大きく破る $S=2.34\pm 0.10$ を得た。この結果は、発生した光子対が量子的非局所相関を保持していることを明らかに示している。半導体から直接生成した量子もつれ光子対が Bell の不等式を破ることを明らかにしたのは本研究が世界で初めてである(Phys. Rev. Lett. 2007 等に掲載)。

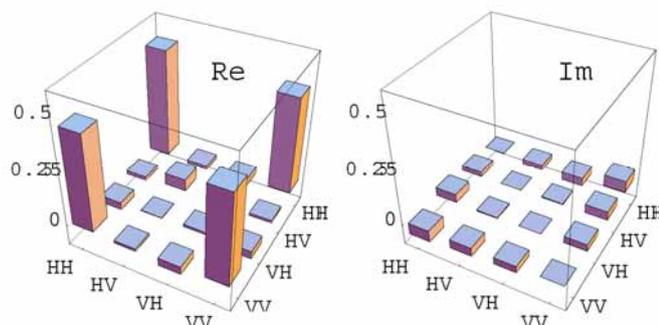


図 3.2 偏光相関の測定結果から推定した2光子偏光状態の密度行列の実部(Re)および虚部(Im)。ここでの基底は水平(H)および垂直(V)の直線偏光である。

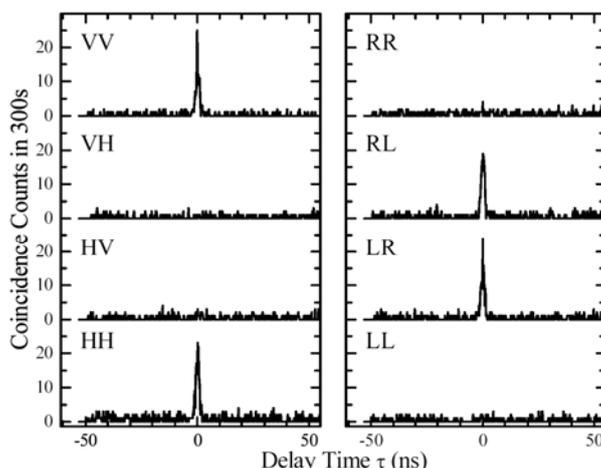


図 3.3 高繰り返し励起レーザーを用いて発生した光子対の偏光相関の測定例。

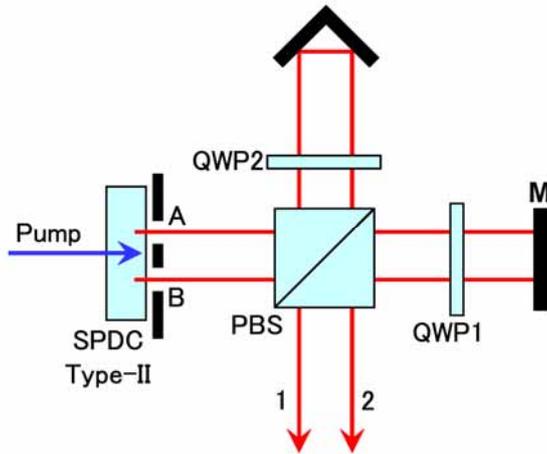


図 3.4 偏光量子もつれ光子対生成方法の概要。
QWP1-2: 1/4 波長板。

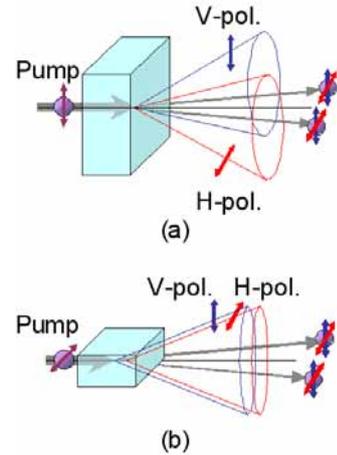


図 3.5 type-II 位相整合条件下での偏光量子もつれ光子対生成の比較。
(a) 複屈折を利用する場合。(b) 90° 位相整合を利用する場合。

(3-3-2) パラメトリック下方変換を用いた新しい量子もつれ光源の開発

半導体を用いた量子もつれ光源の開発と並行して、パラメトリック下方変換過程を利用した量子もつれ光子光源の生成効率向上を目指し、従来とは異なる新たな偏光量子もつれ光子対生成方法を考案し、その実証実験を行った。

一つ目の方法として、空間相関効果を利用した偏光量子もつれ光子対の生成方法について以下に説明する。ここでは直交した偏光(H: 水平偏光, V: 垂直偏光)を持つ2光子が二つのスリット(A および B)にて構成されるダブルスリットを通過した直後の状態を考える。この条件の下では、偏光(|H>および|V>)と空間(|A>および|B>)との自由度を状態ベクトルとして考えることにより、以下のような4準位系の2光子状態を考えることができる。

$$|\psi\rangle = \frac{1}{2} (|H, A\rangle|V, A\rangle + |H, B\rangle|V, B\rangle + |H, A\rangle|V, B\rangle + |H, B\rangle|V, A\rangle) \quad (2)$$

パラメトリック下方変換過程では2光子は結晶中のほぼ同一地点で発生するために、非線形結晶の直後にダブルスリットを設置すると結晶中で発生した2光子は必ず同一のスリットを通過する(空間相関効果)。そのために、パラメトリック下方変換における type-II の位相整合条件とダブルスリットとを利用すると、初期状態として以下の2光子状態を用意できる。

$$|\varphi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|H, A\rangle|V, A\rangle + |H, B\rangle|V, B\rangle) \quad (3)$$

この状態は、偏光の自由度に関しては量子もつれ状態を形成していないが、空間の自由度に関しては量子もつれ状態を形成していることを表している。次に、スリット A, B を通過してきた V(または H) 偏光の光子の位置を入れ替えることを考えると、式(3)の2光子状態は以下のように変換される。

$$|\varphi'\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|H, A\rangle|V, B\rangle + |H, B\rangle|V, A\rangle) \quad (4)$$

この状態を A, B における偏光の2光子状態として、以下のように書き換えることができる。

$$|\phi'\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|H\rangle_A|V\rangle_B + |V\rangle_A|H\rangle_B) \quad (5)$$

この状態は偏光量子もつれ状態を表している。つまり、この操作は初期状態として空間の自由度における量子もつれを形成していた2光子状態を偏光の自由度における量子もつれ状態へと変換したものと考えることも出来る。この操作を実現するために、偏光分割型の Michelson 干渉計(図 3.4)を用いることによって実験を行い、CHSH-Bell の不等式を破る偏光量子もつれ状態が生成されていることを実証した(特願 2006-058437, PCT/JP2007/053974)(論文投稿中)。

二つめの方法として、周期分極反転 LiNbO₃ 結晶(PPLN)結晶を用いた準同軸位相整合による偏光量子もつれ光子対の生成方法について述べる。周期分極反転を使った擬似位相整合素子は高効率な2光子発生素子として研究がなされてきているが、従来の研究ではポンプ光と同軸方向に2光子を高効率に生成させることに注目が集められてきた。この場合、type-II の位相整合条件の下で、ポンプ光と同軸方向に発生した水平偏光の光子と垂直偏光の光子とを無偏光ビームスプリッタで分割することにより偏光量子もつれ光子対を得ることは出来るが、確率的にしか2光子を分割することが出来ないために損失が生じてしまう。そのため、100%の確率で偏光量子もつれ光子対を得るために干渉計内に非線形結晶を配置する方法等を利用しなければならない[1]。これに対し、我々はポンプ光と同軸方向からわずかに角度のついた方向(準同軸方向)に放出される2光子が自然に偏光量子もつれ状態を形成していることを利用して、干渉計を使わずに直接偏光量子もつれ光子対を発生させる方法を考案した。パラメトリック下方変換過程により生成された二光子は位相整合条件によって決定される円錐の斜面に沿って放出される。結晶の複屈折性を利用して位相整合条件を満たす方法では水平偏光と垂直偏光の光子とが放出される円錐の軸は一致しないため、偏光量子もつれ光子対が放出される方向は二つの円錐の交線方向に限られる(図 3.5 (a))。一方で、擬似位相整合を利用した PPLN 素子では周期分極反転の周期を調整することにより任意の波長で 90°位相整合が可能となるため、直交した各々の光子が放出される二つの円錐の軸を一致させることができる。また、円錐の広がり角は結晶の温度制御等により屈折率を変化させることで任意に制御可能である。結晶の複屈折性から水平偏光と垂直偏光の光子とでは円錐の広がり方はわずかに異なるが、円錐の傾角が小さいときには二つの円錐はほとんど重なり合っている(図 3.5 (b))。そのため、放出される光子は円錐の斜面全体にわたって偏光量子もつれ状態を形成した2光子を得ることが出来る。我々は、この方式に基づくパラメトリック下方変換用 PPLN 素子を作製し、発生した光子対の量子干渉実験を行うことによって、CHSH-Bell の不等式を破る偏光量子もつれ状態が生成されていることを実証した(特願 2007-050408)。

(3-3-3) 極少数光子による非線形位相シフトの計測方法の開発

3次非線形光学効果の一つである相互位相変調(XPM)は、光子による光子の量子状態制御を可能とする物理現象であり、量子位相ゲートへの応用が期待されている。その実現のためには従来から単一光子によるπ位相シフトが必要と言われており、これを目指した光カー媒質の創生に向けた研究が数多く行われている。しかし、単一光子に誘起される非線形性は極めて小さいため、現在まで単一光子位相シフト測定としては強い閉じ込めと高い非線形性を併せ持つ高Q共振器中の原子を用いたものしか報告されていない。一方で、現実的な媒質中で誘起される小さな位相シフトを用いた量子位相デバイスの提案も最近注目を浴びている。

本研究では、はじめに、二光子間位相操作のための無損失な光学装置を開発した。次にその装置を測定装置として用い、手軽に入手でき比較的大きな非線形性が誘起可能なフォトニック結晶ファイバ(PCF)において単一光子に誘起される位相シフトの測定を目指し、実験系の改良を行いながら研究を進めた。図 3.6 に本研究で開発した微小非線形位相シフト測定系の概略図を示す。核心部は中央部の偏光サニャック干渉計(PSI)である。

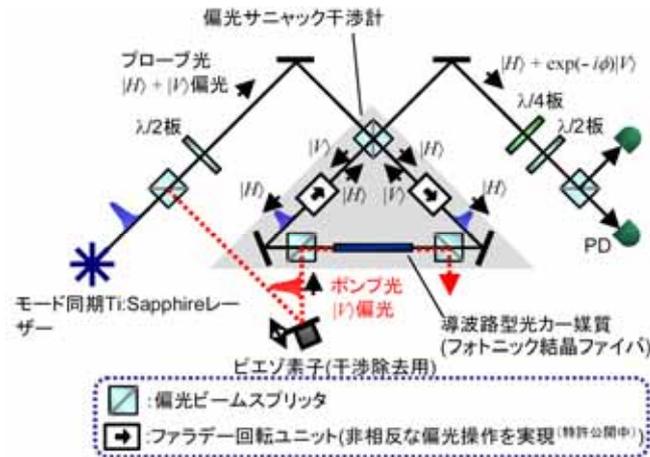


図 3.6 位相シフト測定系概略図。

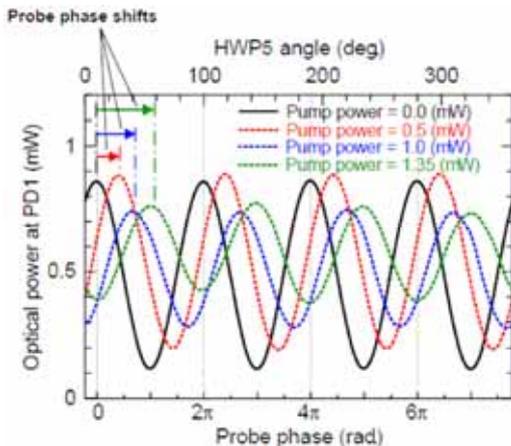


図3.7 古典領域におけるプローブ光位相シフトの測定。

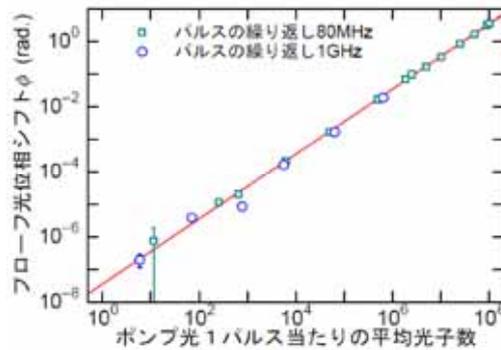


図3.8 ポンプ光 1 パルスあたりの光子数に対するプローブ光位相シフト量の測定結果。

サニャック干渉計を用いることにより、PCF 中で自己位相変調によりプローブ自身に誘起される位相シフトや、光学系および PCF の揺らぎによるプローブ光の位相変化を除去することができる。PSI 中にはファラデー回転子および 1/2 波長板で構成される非相反偏光素子を挿入し、縮退しているポンプ・プローブ光の同軸入射にもかかわらず両者の無損失な分離・結合を実現している。ポンプ光による XPM の結果、PSI 出射後のプローブ光の偏光状態は、XPM による位相シフト量を ϕ として $|H\rangle + e^{i\phi} |V\rangle$ となる。この偏光状態を波長板、偏光ビームスプリッタ、差動検出器からなる検出系で測定することにより、プローブ光の位相シフト量を測定する。この測定結果を図 3.7 に示す。この図より、入射ポンプ光強度の増大に伴い位相シフト量が増加し、ポンプ光強度が 1.35mW 程度のときに π の位相シフトが実現されることがわかる。これらの測定装置および測定結果を、特許(特願 2005-353505, PCT/JP2006/324359)および論文(Apl. Phys. Lett. 2007)として発表した。

さらに、少数の光子によって誘起される微小な位相シフトの測定を可能とするため、測定系の高感度化および雑音の除去を行った。そのために、ポンプ光の有無に同期したロックイン検出による S/N の向上、ポンプ光の微弱な漏れとプローブ光との干渉によるノイズを除去するためのポンプ光とプローブ光の光路差の高速変調、高性能差動検出器の採用によるレーザー強度ノイズの除去、1 GHz 高繰り返しパルスレーザーを用いることによってプローブパルス尖頭値を低下させ、プローブ光が自身に誘起する非線形な位相雑音の

抑制、等の対策を行った。このようにして測定された XPM 誘起位相シフト量を、ポンプ光 1 パルスあたりの光子数に対してプロットしたものを図 3.8 に示す。構築した測定装置に上述の高感度化法を組み合わせ、ポンプ光子 6 個程度に誘起される 10^{-7} 程度の微小な位相シフトを精度よく測定することに成功した(国際会議 International Quantum Electronics Conference 2007 で口頭発表)。さらに、励起レーザーパルスあたり平均 1 個以下の光子による非線形位相シフトの観測にも成功した(論文準備中)。

(2)研究成果の今後期待される効果

(3-3-1) 半導体を用いた量子もつれ光源

半導体を用いた量子もつれ光子の発生(Nature 2004)は、本研究が世界に先駆けて実現したものである。その後、海外の 2 つの有カグループが半導体量子ドットを用いた量子もつれ光子の発生を報告している。しかし、本研究において達成された高純度な量子もつれ光子の発生(Phys. Rev. Lett. 2007)は、それらの追従研究のさらに先を行く大きなインパクトをもつ成果である。今後は、理論グループの予言するように、特定の膜厚の薄膜構造や微小共振器構造を組み合わせることによって高い生成効率を達成し、さらにインパクトのある成果につながることを期待される。

また、本研究で実証されたハイパーパラメトリック散乱による量子もつれ光子発生を CuCl 以外の物質系に拡大することも、さらに大きなインパクトにつながる。まず、CuCl に次いで励起子が安定な物質である ZnO や GaN 等への適用が最も期待される。最終的には、電流励起による真に実用的な量子もつれ光源の実現へとつながる。

(3-3-2)パラメトリック下方変換を用いた新しい量子もつれ光源の開発

本研究で開発したパラメトリック下方変換による量子もつれ光源は、フォトニック結晶ファイバや GaAs 系半導体を非線形光学媒質として用いた量子位相ゲートの研究用光源として位置づけられる。しかし、この光源はそのような用途のみならず、量子情報通信技術において非常に広い応用範囲をもつ。例えば、空間相関を用いた量子もつれ光子の発生は、そもそも空間相関が連続量の量子もつれであるため、3 次元以上(qudit)における量子もつれ光子生成に容易に拡張可能であることが大きな特徴である。また、擬似位相整合を用いた量子もつれ光子生成は、その効率の良さを生かし、多光子(4 光子、6 光子..)間の量子もつれの生成実験への応用が期待される。

(3-3-3) 極少数光子による非線形位相シフトの計測方法の開発

量子情報通信技術は著しい発展を遂げており、国際的な競争が激化している。そのなかでも、固体を用いた量子位相ゲートは、切望されているにもかかわらず最も実現が難しいとされている技術の一つである。最近、比較的小さな光学非線形性でも deterministic な量子ゲートへ適用可能になるとの理論(Qubus)が提唱され注目を集めている。そこでは、微小な非線形位相シフトを利用、測定する技術の開発が不可欠である。本研究で開発した、少数光子に誘起された微小非線形位相シフトの測定技術は、そのような応用において中核的な技術となり得るものである。ただし、本研究で用いたようなフォトニック結晶ファイバでは非線形性がまだ足りず、位相シフトの測定のためには非常に多くのパルスを用いた繰り返し測定が必須であった。量子位相ゲートとしての動作に必要な単一パルスによる光学非線形性の測定のためには、今後、より光学非線形性を高めた物質開発を進めていく必要がある。残念ながら研究期間内にはなし得なかったが、理論グループおよび試料作製グループと協力し、従来にない高い光学非線形性をもった固体媒質を開発することが急務である。本研究は、そのような固体量子位相ゲートの実現へ向けた物質開発研究の契機ともなるものである。

3.4 実験検証に対する理論支援と新規理論予想 (大阪府立大学 石原グループ)

(2) 研究実施内容及び成果

理論グループの目的は、[1]これまで理論的に予想されてきた物理現象を実験検証する際に実験グループが具体的なターゲットを選定するための支援と、結果の解析、及び[2]新奇デバイス機能探求に向けた新しい理論的予言、を行うことであった。以下、この目的に沿って行われた理論研究を各実験グループとの関連毎にまとめて説明する。

超高速光スイッチ G、新現象・新材料探索 G における高速非線形光学実験の支援

(3-4-1) 励起子-光結合状態のモード構造

薄膜に閉じ込められた励起子の光学応答の研究は 30 年以上の歴史を持ち、ナノ系光学応答研究のプロトタイプとも言える。それにもかかわらず、いわゆるポラリトン干渉の問題以外その研究のほとんどは長波長近似の枠内にとどまっておき、閉じ込め励起子と光の結合系がどのようなモード構造を示すのかについては最近まで十分な議論がなかった。本研究では応答の非局所性と、光電場と誘起分極波のセルフコンシステンシーをフルに取り入れた理論的手法により、ナノ領域からバルクに近い領域までの光 励起子結合状態の包括的な記述を試みた。その結果、nano-to-bulk クロスオーバー領域では単に量子化した励起子準位の間隔が狭まっていく、あるいは、いわゆる振動子強度のサイズ比例増大が続いていくのではなく、巨大な輻射シフトを反映して非長波長近似領域に特有な「膜厚の増大にともなう量子状態の入れ替わり」が生じたり、あるいは輻射緩和定数のサイズ共鳴増大が生じたりすることが明らかになった。(図 4.1 参照) このような知見は本プロジェクトが研究対象としていた非長波長近似領域での非線形応答や輻射緩和定数の特異な試料サイズ依存性を理解するための明瞭な物理的基礎を与えただけでなく、まだ実験的にアプローチされていなかった領域での巨大な輻射結合の予言や、新現象・新材料探索グループが観測した特異なモード構造のいち早い理解に結びついた。なお、この理論により予言されていた量子状態の入れ替わりなどの現象についても入射光との干渉を巧みに回避する 2 光子散乱法を用いた実験により、理研グループと共同で検証することが出来た。

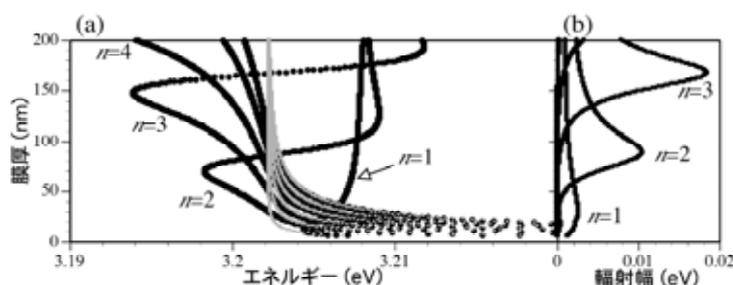


図 4.1 (a) : 閉じ込め励起子準位 (灰色記号) と輻射シフトを含んだ準位 (黒色記号)、 $n = 6$ までを表示した。(b) : 閉じ込め励起子準位の輻射幅

(3-4-2) 非長波長近似領域における励起子光学応答の実時間解析

本プロジェクトでは、ナノからマクロへのクロスオーバー領域に現れる光-励起子の長距離結合に基づく超高速輻射緩和を実験的に追求した。このような現象を理論的に解析し、また新たな予言を行っていくためには、物質の分極波と光の双方の空間構造を適切に取り入れた理論が必要である。特に、光スイッチグループ、新現象グループでは四光波混合や過渡応答実験など非線形応答を主要な実験手段にしており、また光スイッチ機能自体、非線形機能であるが、このような非線形応答は周波数領域での計算結果をフーリエ変換することでは得られないため、応答を直接実時間の関数として計算する手法が必要となる。本研究では、世界的にも本チームが独自に有するこのような理論的手法を駆使し、実験結果を

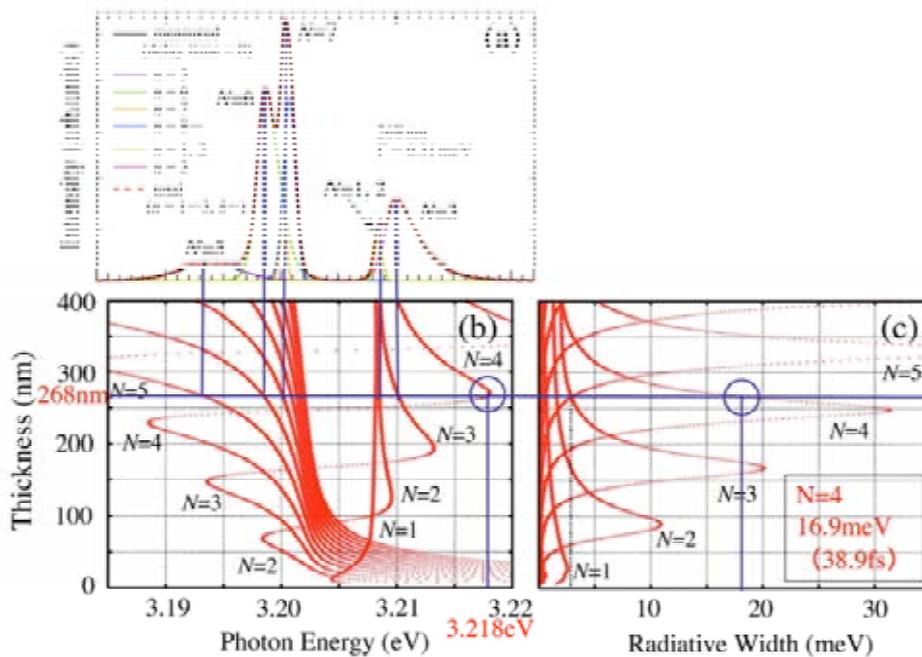


図4.2 (a)実験で観測されたTG スペクトルの一例。(b)(c)はそれぞれ励起子-輻射場結合系の固有エネルギー・輻射幅の膜厚依存性。実験のスペクトルにおいて、4番目準位の寄与は顕著に現れていないが、入射パルス条件を変え、大きな輻射幅をもつ4番目準位の寄与のみをうまく取り出すことができれば、量子ビートのない、数十フェムト秒（約39fs）もの超高速応答が期待できる。

解析してきた。特に、実験で観測された超高速応答が非長波長近似領域の輻射幅の異常増大現象に起因するものであることを輻射場のナノ空間構造を取り入れた周波数解析及び実時間解析の両手法を用いて検証した。以下その解析例を紹介する。図4.2(a)は、実験で得られた四光波混合のスペクトルであるが、それぞれのピーク位置が、対応する膜厚での励起子-輻射場結合系の固有エネルギー位置(図4.2(b))に一致する。この膜厚では、4番目の励起子準位($n=4$)が巨大な輻射幅(16.9meV)をもつことが図4.2(c)より分かるが、入射パルスの中心位置(3.20eV 付近)から離れ、他の準位に比べて十分な強度が得られないため、実験のスペクトルではこの準位からの寄与は顕著ではなかった。しかし、

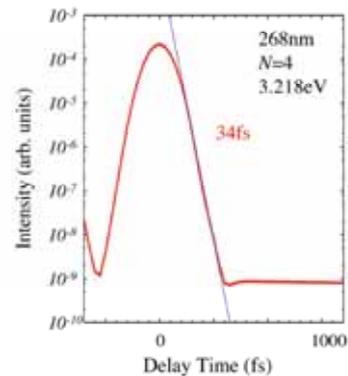


図4.3 実時間解析で求めたTG 信号強度の遅延時間依存性 ($n=4$ の準位に対応)。量子ビートなしで約34fs の超高速応答を確認した。

$n=4$ の準位の寄与が優勢になるように入射パルス位置を適切に調整すれば、単一の巨大輻射幅を反映した(約39fsもの)超高速輻射緩和が期待できる。図4.3はそのような最適条件を仮定した計算であるが、量子ビートなしで数十フェムト秒の超高速応答が得られることが予想される。この結果から、入射パルス条件や薄膜の品質などによってその非線形光学特性が大幅に変化し、究極的な速さの励起子輻射緩和が得られる可能性が明らかになった。同様な条件での実験検証が今後の課題となっている。

新現象・新材料探索 G における共鳴輻射力の研究に関して

(3-4-3) 光マニピュレーションの理論

本プロジェクトに先立って代表者らはナノ物質の量子力学的個性を反映した共鳴輻射力により、新奇なナノ光マニピュレーションが可能であることを理論的に提案していた。特に、プロジェクト開始後、極低温かつ超低粘性の媒質である超流動ヘリウム中で共鳴光照射されたナノ物質の力学的運動を数値的に評価し、現実的なレーザー光の条件で、数秒間で数cm というマクロな距離に渡って輸送できる可能性を指摘した。そこでは、レーザー幅と輻射力についても考察し、線幅の細かいレーザー光を用いれば高精度な選択操作が行える可能性があることも見出し、「量子ナノ光クロマトグラフィー」などの新技術を提案した(図4.4参照)。このような提案に基づいた超流動ヘリウム中での新現象・新材料探索Gの実験により、共鳴光によるナノ微粒子の選択的光輸送が可能であることが実証された。

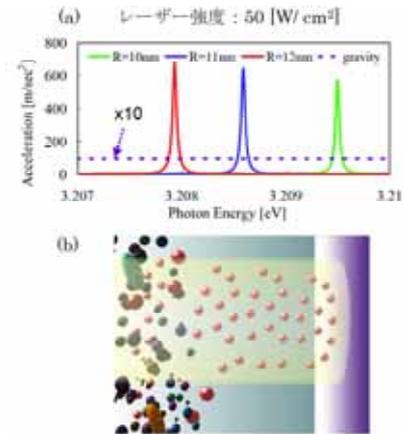


図4.4：(a)半径の異なる単一の球状半導体量子ドット(CuCl)に共鳴光が及ぼす輻射力による加速度の周波数依存性の計算結果。(b)左からの伝播光による散乱力・吸収力で選別されたナノ微粒子を右端の基板上に輸送(概念図)。

(3-4-4) 光誘起粒子間力の研究

共鳴輻射力に関する研究の新しい段階として、複数のナノ物質が近接して密に存在する場合の力の特性に関する研究も行った。複数ナノ物質が存在する条件下で共鳴光を照射した場合の輻射力を計算し、ナノ物質間に働く力の性質がレーザー光の条件(周波数、偏光、位相etc.)に依存し、これらを変えることで引力・斥力がスイッチングできる可能性を明らかにした。そこでは異なるナノ構造体中のポラリトン(光-物質結合状態)が電磁場を介して結合・反結合状態を形成する「ポラリニック分子」の概念を導入して力の仕組みを説明した(図4.5)。また、あるナノ物質中の分極の位相が別のナノ物質からの応答場によって変調され、照射伝播光の進行方向と同じ方向にのみ働くと考えられていた散乱力・吸収力の符号が反転する、いわゆる「負の散逸力」が得られる条件も見出した。この現象は複合的な外場印加によってナノ物質中電子状態を変調することで共鳴輻射力を様々にデザインできる可能性を示しており、光操作の自由度を飛躍的に高める可能性がある。ま

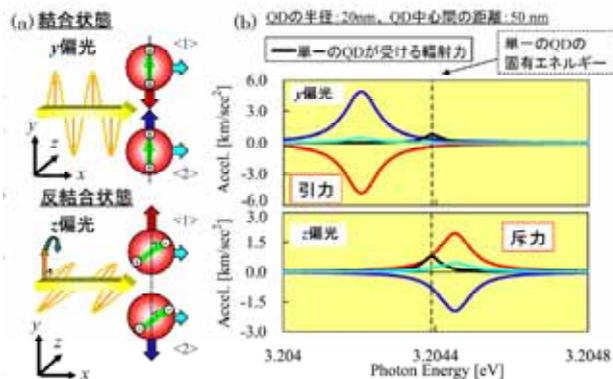


図4.5：(a)計算のモデル。近接する2つの量子ドット(QD)に異なる偏光の光を入射。(b)生じる輻射力の各成分を加速度に変換し、励起光の周波数(光子エネルギー)の関数としてプロットした(レーザー強度：50 [W/cm²])。(a)中の矢印の色とグラフの線の色がそれぞれ対応している。ただし、緑色の矢印はQD中の誘起分極の向きを表す。

た、粒子間輻射力を利用することによって新しいタイプの力検出型の走査型顕微鏡が可能であることも議論した。

量子位相ゲート G における研究に関して

(3-4-5) 2光子非線形光学応答の理論

物質系と光の相互作用を最も厳密に記述する理論的枠組みは両方を量子化する全量子論であるが、一方で輻射場を古典的に取り扱う半古典論は多数の光子モードを直接扱わなくてよいため、特に凝集系など多自由度を含む系を対象とする場合にその威力を発揮してきた。近年、量子位相ゲート実現を目指して2光子非線形性の研究が重要度を増してきたが、本来古典的振幅の概念が成り立たない光子領域での議論であるため、この分野では全量子論的アプローチが不可欠と考えられていた。そのような中、本プロジェクトでは光子の量子力学的な非線形位相変化であっても、系が与える最大量については半古典的な計算から導き出せることを、全量子論と半古典論の詳細な比較から明らかにした。このことは光子数状態の位相変化のような純量子力学的情報が、凝集系を対象とした場合でもその自由度に打ち勝って導き出せることを意味しており、本結果は将来的に量子光学と光物性の両分野を繋ぐ重要な役割を果たすものと考えられる。

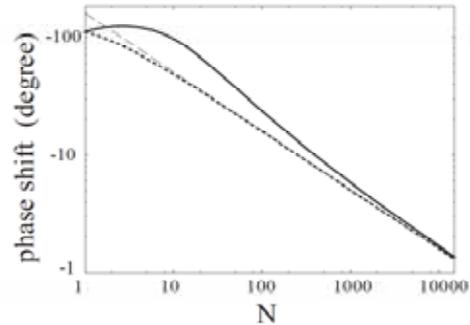


図 4.6 非線形位相シフトと原子数 N の関係。両者の間にトレードオフの関係がある。

さらにこの手法を用いて共振器中の原子による2光子非線形による位相シフトと原子数の関係を調べたところ、原子数と位相シフトの間にトレードオフがあることが明らかになった(図4.6参照)。これは自由度の増大とともに系がより調和的に振舞うようになり吸収飽和による2光子非線形性が弱まるからであるが、実際に系を構築する場合には共振器中には多原子系や固体などの多自由度系が導入されやすい。デバイスなどへの応用を考えるとこのような減退が起こらない機構が望まれる。そこで本プロジェクトでは、この問題を回避できる新しい機構を提案し、2光子非線形性が減退しないための物質系および入力光子対の条件を明らかにした。結論としては、共振器中の2粒子状態が作り出す非調和性が最大限に利用できる条件下では、共振器内の3準位原子数 N が増大しても2光子非線形性が減退しないことが分かった。厳密には適当な条件を満たせば、原子数 N について1個のオーダーでの数の制御を行わなくても桁の制御を行いさえすれば十分な位相シフトが確保できることを明らかにした(図4.7参照)。この結果は原子系に限らず分子系や量子ドット励起子分子系など3準位系全般に適用することが可能で、一般性がある。現在は、ここで提唱した機構を実現することができる具体的な系について検討を進めている。

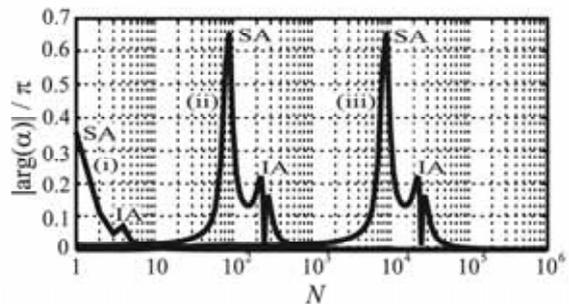


図 4.7 非線形位相シフトと原子数 N の関係。3準位系の場合。3種の条件(i)(ii)(iii)の違いにより位相シフトが大きくなる原子数 N が大きく異なる。

(3-4-6) もつれ合い光子対生成における共振器QEDの効果

もつれ合い光子対は量子情報処理における重要な要素であり、その生成効率を向上させることは量子情報処理技術を実用化するための重要な目標の1つであると考えられる。生成効率の向上には光と物質の非線形相互作用を強めることが必要であり、その手段の1つとして共振器の利用が挙げられる。本プロジェクトでは、(i) 両側共振器に量子ドットを埋め込んだ系、(ii) 片側共振器に量子井戸を埋め込んだ系の2つの場合を考え、コヒーレント光を入射したときの共鳴ハイパーパラメトリック散乱(RHPS)によるもつれ合い光子対生成効率を、共振器QEDを用いて理論的に調べ、どちらの場合も共振器を用いることにより、もつれ合い光子対の生成効率が著しく増強する条件があることを明らかにした。ただし、その条件は2つの場合で全く異なる。量子ドットの場合、入射光ともつれ合い光子対が放出される方向は同じであり、もつれあっていない光子対が検出される可能性もある。そこで、生成効率を高くするだけでなく、visibility を1に近づける必要があるが、そのためには、光と励起子との相互作用とQ値を十分大きくすればよい。このような条件では、フォトン・ブロックードにより同種偏光の光子対の放出が強く抑制される。また、2粒子励起状態を共鳴励起するように入射光の振動数を調節することで、共振器効果による生成効率を増強させることができる。この場合には、励起子分子はもつれ合い光子対の生成に本質的ではない。量子井戸の場合、入射光ともつれ合い光子対が放出される方向が異なるので、ほとんどすべての光子対はもつれあっている。また、入射光と異なる方向に放出される光子対は、励起子分子を励起しなければ生成されない。ただし、励起子分子を励起するためには、共振器モードの光子を含む状態も励起する必要がある。すなわち、もつれ合い光子対の生成効率を最も高くするためには、励起子分子と共振器モードの光子を含む状態がほぼ同等に重ね合わされている2粒子励起状態を共鳴励起すればよいことが分かった。これらの理論提案は今後の実験検証の最重要課題となっており、近い将来実験検証が行われる予定である。

(3-4-7) 閉じ込め励起子に対する QED 理論とその応用

理論グループでは、量子位相ゲートグループと協力するため、凝集系励起状態の微細な構造まで考慮できる量子電磁力学(QED)理論を構築し、様々な量子情報デバイスにとって最適な物質の構造を提案、および設計するための準備を行った。その第一歩として弱閉じ込め励起子に対するQED理論の構築を試みた。吸収や分散(誘電率の振動数依存性)のある誘電媒質中でのQED理論は近年盛んに研究されてきたが、物質の取り扱いが巨視的であり、励起子の重心運動などに起因する非局所的な感受率が扱われたことはほとんどなかった。ナノ物質中の励起子を議論する際には、そのような非局所性を考慮することが必要不可欠であり、光を古典的に扱う半古典的枠組みにおいては、いわゆる微視的非局所理論によって記述が試みられてきた。理論グループでは、その理論における計算手法と上述のQED理論を組み合わせることで、弱閉じ込め励起子に対するQED理論を線形光学過程の範囲で構築した。

また、この理論を用いて、CuCl薄膜に閉じ込められた励起子分子からの量子もつれ光子対生成の理論研究を行った。結果として実験グループに提案すべき次のような知見が得られた。(a) 2光子共鳴励起により励起子分子を生成した場合にはバルク試料に比べ、数100nmの膜厚領域で励起子の干渉効果に起因する性能の良い生成条件が存在する。また(b)試料が薄い領域では非縮退光による励起子分子の誘導励起により効率的に励起子分子が生成でき、これによりバルクの数倍の性能が得られ、かつ、バルクと同程度の信号強度が得られる高効率なもつれ合い光子対生成が可能となる。これらの結果についても近日中に実験的な検証を試みる予定である。

(2)研究成果の今後期待される効果

(3-4-1) 励起子-光結合状態のモード構造

(3-4-2) 非長波長近似領域における励起子光学応答の実時間解析

これらの理論研究では、従来の長波長近似の枠を越えて物質素励起の波動と光波動が数波長に渡って結合する、新しい光-物質結合様式を明らかにし、また実験的にも検証されてきた。今後この新しい物理の基礎をさらに明らかにし、デバイス応用へ結びつけていくためには一層理論の役割が重要になると考えられる。このテーマにおいては今後、以下のような展開が考えられている。

(a) 長距離結合が実現した場合、輻射緩和が位相緩和より著しく高速になることが確認されているが、この場合次の2種の問題が浮上する。一つは、位相緩和や波長に制限されない状況で、輻射結合がどこまで大きくなるか、それはどこまで観測可能か、という問題。もう一つは、どの程度の温度まで輻射緩和時間 < 位相緩和時間の関係が確保できるか、という問題である。今後、理論的課題として、位相緩和の原因である格子振動等の自由度を取り入れた可能な限り第一原理的な手法を取り入れた理論により上の問いに答えていく作業を進める予定である。これらの問題の解決は、室温(或いは実用的温度領域)での励起子デバイスの実現に結びつく可能性を秘めており、今後のデバイス応用上、極めて重要な問題である。

(b) 現在まで上記理論的検討を主に CuCl, GaAs 系などを対象に行ってきたが、今後、ZnO, GaN など、デバイス応用上主流である物質群に拡張していく必要がある。特に ZnO については CuCl 等に比べ励起子が位相緩和に強く、室温において活性である点がデバイス応用上有望と考えられている。本プロジェクトで掘り起こしてきた励起子系の新しいポテンシャルを種々の物質系での実験的研究を通してさらに明らかにしていく上でも、この点における理論の役割は大きい。

上記、(a)(b)の研究は将来的には実用温度領域での励起子デバイス実現に結びつく可能性がある。励起子共鳴は本来そのポテンシャルから光スイッチデバイスへの応用が有望視されてきたが、位相緩和に弱いため応用への道筋が明確ではなかった。しかし、上記研究がこの問題を克服できれば光デバイス産業へ大きな影響を与えるものと期待される。

(3-4-3) 光マニピュレーションの理論

(3-4-4) 光誘起微粒子間力の研究

共鳴輻射力がナノ構造のマクロな運動を有効に制御することが実験的にも検証され、このテーマの課題が大きく広がってきた。(実験も含めた今後の課題については伊藤グループの欄で詳述した。) 実験的検証を先導すべき理論的課題は数多くあるが、代表的なものとしては以下が考えられている。

- (a) 超流動ヘリウム中での光マニピュレーションをさらに進めるための理論的検討として、集光ビームやラゲールビーム、および種々のビームを複合した場合の輻射力の詳細な検討。
- (b) キラリティー選別の可能性を追求するための、キラリティーを持つ分子系、或いは分子結晶に対する輻射力の詳細な検討。
- (c) 共鳴輻射力を利用した力検出型走査顕微鏡の可能性の検討。試料の励起状態の空間構造やダイナミクスの観測手段の開発。

以上のような研究を通して、実験的研究を先導し、ナノ構造の製造や計測・観測技術の全

く新しい方法論を構築する．このような研究の狙いが達成されれば，選別されたナノ構造体の集合様態・配列の制御にも道が拓かれる．また，このような技術から生み出される超高均質材料は単に既存機能の性能向上だけでなく，質的にも全く新しい機能を提供する可能性があり，目指す技術はあらゆる産業の基盤技術になり得，新産業創出に向けた扉が開かれるものと期待される．

(3-4-5) 2光子非線形光学応答の理論

(3-4-6) もつれ合い光子対生成における共振器QEDの効果

(3-4-7) 閉じ込め励起子に対する QED 理論とその応用

量子位相ゲートグループとの一連の共同研究において推進された理論研究は，これまで手薄であった固体物性と量子電磁気学，或いは量子光学の融合領域を拓く役割を果たしてきた．現在の量子計算，量子情報処理関連技術の研究においてはそのスキームにおける研究が先行しているが，将来的なデバイス実装を考えた場合，物質科学的基礎により支えられる必要があるのは言うまでもない．このような観点から，本プロジェクトでは，全量子論をバイパス出来る2光子非線形理論や，非局所性を正しく取り入れることの出来る全量子論などの開発を行ってきた．今後，この成果を基に以下のような展開が見込まれている．

(a)2光子非線形による位相シフトについては上記理論により，有効なシフトを得るための指針が明らかになってきたが，実験検証が必要であり，今後，具体的物質パラメーターを基にした理論計算に基づき，これを支援していく．

(b)本研究において，もつれ合い光子対生成における画期的な増強スキームを提案してきたが，これについても実験で用いられる具体的物質における検討が必要になっている．この点については枝松による学術創成研究にも一部引き継がれる予定である．

以上の進展は，今後の量子計算，量子情報処理関連技術の開発に必要不可欠な研究であり，今後この分野が将来の重要技術として位置付けていくための基礎を支えていくことになると考えられる．

4 研究参加者

理論グループ(理論解析による実験支援、モデル計算による新奇現象の提案の研究)

氏名	所属	役職	研究項目	参加時期
石原 一	大阪府立大学 大学院工学研究科	教授	理論解析	平成 14 年 11 月～ 平成 20 年 3 月
張 紀久夫	豊田理化学研究所	専任フェロ ー	理論の枠組み提案	平成 14 年 11 月～ 平成 20 年 3 月
越野 和樹	東京医科歯科 大学 教養部	准教授	理論解析	平成 15 年 4 月～ 平成 20 年 3 月
安食 博志	大阪大学 大学 院基礎工学研究科	助教	理論解析	平成 15 年 4 月～ 平成 20 年 3 月

飯田 琢也	大阪府立大学 大学院工学研究科	助教	理論解析	平成 14 年 11 月 ~ 平成 20 年 3 月
石川 陽	科学技術振興 機構	CREST 研 究員	理論解析	平成 17 年 9 月 ~ 平成 20 年 3 月
馬場 基彰	大阪大学 大学 院基礎工学研究科	博士後期 課程 日本学術 振興会特 別研究員	理論解析	平成 16 年 4 月 ~ 平成 20 年 3 月
保田 英樹	大阪府立大学 大学院工学研究科	研究補助 員(博士後 期課程)	理論解析	平成 16 年 4 月 ~ 平成 20 年 3 月
三船 洋嗣	大阪大学 大学 院基礎工学研究科	博士前期 課程	理論解析	平成 15 年 4 月 ~ 平成 16 年 3 月
矢垣 真也	大阪大学 大学 院基礎工学研究科	博士前期 課程	理論解析	平成 15 年 4 月 ~ 平成 16 年 3 月
石川 貴博	大阪府立大学 大学院工学研究科	博士前期 課程	理論解析	平成 18 年 10 月 ~ 平成 20 年 3 月
谷口 和也	大阪府立大学 大学院工学研究科	博士前期 課程	理論解析	平成 18 年 10 月 ~ 平成 20 年 3 月
吉水 聖	大阪府立大学 大学院工学研究科	博士前期 課程	理論解析	平成 18 年 10 月 ~ 平成 20 年 3 月
福田 伸子	大阪大学 大学 院基礎工学研究科	文部事務 官	チーム事務	平成 14 年 11 月 ~ 平成 17 年 3 月
出口 秀美	科学技術振興 機構	チーム事 務員	チーム事務	平成 17 年 4 月 ~ 平成 20 年 3 月

超高速光スイッチグループ (GaAs 薄膜構造による高効率光スイッチ素子作製の研究)

氏名	所属	役職	研究項目	参加時期
井須 俊郎	徳島大学 大学 院ソシオテクノ サイエンス研究 部 (情報通信研究 機構)	客員教授 (特別研究 員)	超高速光スイッチ	平成 14 年 11 月 ~ 平成 20 年 3 月
秋山 浩一	三菱電機(株)	主事研究 員	超高速光スイッチ	平成 14 年 11 月 ~ 平成 16 年 8 月

土屋 昌弘	情報通信研究機構	グループリーダー	超高速光スイッチ	平成 16 年 9 月～平成 20 年 3 月
小島 磨	神戸大学 工学部 (情報通信研究機構)	助教 (特別研究員)	超高速光スイッチ	平成 17 年 4 月～平成 20 年 3 月
森田 健	徳島大学 大学院ソシオテクノサイエンス研究部	助教	超高速光スイッチ	平成 19 年 4 月～平成 20 年 3 月
早瀬 潤子	情報通信研究機構	専攻研究員	超高速光スイッチ	平成 18 年 4 月～平成 20 年 3 月
レドワン カトフ	情報通信研究機構	専攻研究員	超高速光スイッチ	平成 18 年 4 月～平成 20 年 3 月
菅野 敦史	情報通信研究機構	専攻研究員	超高速光スイッチ	平成 18 年 5 月～平成 20 年 3 月

新現象新材料探索グループ(II-VI, I-VII 系薄膜、量子ドットを用いた新材料開発と新奇現象の探索の研究)

氏名	所属	役職	研究項目	参加時期
伊藤 正	大阪大学 大学院基礎工学研究科	教授	新材料探索	平成 14 年 11 月～平成 20 年 3 月
芦田 昌明	大阪大学 大学院基礎工学研究科	准教授	新材料探索	平成 15 年 4 月～平成 20 年 3 月
宮島 顕祐	大阪大学 大学院基礎工学研究科	助教	新材料探索	平成 14 年 11 月～平成 20 年 3 月
片山 郁文	横浜国立大学 学際プロジェクト研究センター	特任教員 (助教)	新材料探索	平成 18 年 10 月～平成 20 年 3 月
アンドレイ カピタノフ	大阪大学 大学院基礎工学研究科	CREST 研究員	新材料探索	平成 14 年 11 月～平成 15 年 3 月
一宮 正義	科学技術振興機構	CREST 研究員	新材料探索	平成 16 年 4 月～平成 20 年 3 月
南口 勝	大阪大学 大学院基礎工学研究科	博士後期課程	新材料探索	平成 15 年 4 月～平成 18 年 3 月
籠谷 勇児	大阪大学 大学院基礎工学研究科	博士後期課程	新材料探索	平成 17 年 4 月～平成 18 年 3 月

片山 浩一	大阪大学 大学院基礎工学研究科	博士後期課程	新材料探索	平成 18 年 10 月 ~ 平成 19 年 3 月
稲葉 和宏	大阪大学 大学院基礎工学研究科	博士後期課程	新材料探索	平成 18 年 4 月 ~ 平成 20 年 3 月
澤田 祐志	大阪大学 大学院基礎工学研究科	博士後期課程	新材料探索	平成 18 年 10 月 ~ 平成 20 年 3 月
櫻井 康平	大阪大学 大学院基礎工学研究科	博士前期課程	新材料探索	平成 18 年 10 月 ~ 平成 20 年 3 月
望月 敬太	大阪大学 大学院基礎工学研究科	博士前期課程	新材料探索	平成 18 年 10 月 ~ 平成 20 年 3 月

光量子位相ゲートグループ(「光電場のナノ空間構造」による高非線形を利用したユニバーサル量子位相ゲートの開発の研究)

氏名	所属	役職	研究項目	参加時期
枝松 圭一	東北大学 電気通信研究所	教授	量子位相ゲート	平成 14 年 11 月 ~ 平成 20 年 3 月
小坂 英男	東北大学 電気通信研究所	准教授	量子位相ゲート	平成 15 年 10 月 ~ 平成 20 年 3 月
三森 康義	東北大学 電気通信研究所	助教	量子位相ゲート	平成 16 年 4 月 ~ 平成 20 年 3 月
清水 亮介	科学技術振興機構	JST 専任研究者	量子位相ゲート	平成 14 年 11 月 ~ 平成 20 年 3 月
張 鈞	東北大学 電気通信研究所	博士後期課程	量子位相ゲート	平成 17 年 4 月 ~ 平成 20 年 3 月
松田 信幸	東北大学 電気通信研究所	博士後期課程	量子位相ゲート	平成 18 年 4 月 ~ 平成 20 年 3 月
加藤 範泰	東北大学 電気通信研究所	博士前期課程	量子位相ゲート	平成 18 年 10 月 ~ 平成 20 年 3 月
杉浦 洋平	東北大学 電気通信研究所	博士前期課程	量子位相ゲート	平成 18 年 10 月 ~ 平成 20 年 3 月
山口 貴司	東北大学 電気通信研究所	博士前期課程	量子位相ゲート	平成 18 年 10 月 ~ 平成 20 年 3 月

5 招聘した研究者等

氏名(所属、役職)	招聘の目的	滞在先	滞在期間
Prof. Monique Combescot (パリ第6大学 教授)	CREST&QNN03 ジョイント国際ワークショップにて講演の為	大阪府豊中市 (大阪大学待兼山会館)	平成 15 年 6 月 30 日 ~ 7 月 30 日 (7/1-20.7/24-29 阪大で打ち合わせ)
Dr. Andrei Stanishevsky (アラバマ大学 物理学科 講師)	CREST&QNN03 ジョイント国際ワークショップにて講演の為	兵庫県淡路市 (ウェスティンホテル)	平成 15 年 7 月 19 日 ~ 26 日 (24・25 日 NEC 基礎研究所と打ち合わせ)
中山 正昭 (大阪市立大学 大学院工学研究科 教授)	CREST「光電場のナノ空間構造による新機能デバイスの創製」シンポジウムにて講演の為	兵庫県淡路市 (ウェスティンホテル)	平成 19 年 3 月 1 日 ~ 3 日
相原 正樹 (奈良先端科学技術大学院大学 物質創成科学研究科 教授)	CREST「光電場のナノ空間構造による新機能デバイスの創製」シンポジウムにて講演の為	兵庫県淡路市 (ウェスティンホテル)	平成 19 年 3 月 1 日 ~ 3 日
竹内 繁樹 (北海道大学 電子科学研究所 教授)	CREST「光電場のナノ空間構造による新機能デバイスの創製」シンポジウムにて講演の為	兵庫県淡路市 (ウェスティンホテル)	平成 19 年 2 月 28 日 ~ 3 月 2 日 (28 日阪大で打ち合わせ)
大畠 悟郎 (大阪府立大学 大学院理学研究科 助教)	CREST「光電場のナノ空間構造による新機能デバイスの創製」シンポジウムにて講演の為	兵庫県淡路市 (ウェスティンホテル)	平成 19 年 3 月 1 日 ~ 3 日

6 成果発表等

(1) 原著論文発表 (国内誌 0 件、国際誌 106 件)

2003 年

1. T. Iida and H. Ishihara, "Theory of optical manipulation of semiconductor quantum dots confining excitons", *Phys. Stat. Solidi B* **238**, 241 (2003).
2. T. Iida and H. Ishihara, "A new type of optical manipulation of nanoscale objects", *QELS 2003 Technical Digest, QWA7* (2003).
3. H. Ishihara, "Nonlocality induced anomalous input-intensity dependence of optical response for weakly confined excitons in a ultrathin film", *Phys. Rev. B* **67**, 113302 (2003).
4. H. Ishihara and T. Nakatani, "Influence of exciton-exciton interaction on the system-size dependence of $\chi^{(3)}$ at one-exciton resonance", *QELS 2003 Technical Digest, QtuG19* (2003).
5. K. Miyajima, K. Edamatsu, and T. Itoh, "Infrared transient absorption of excitons and biexcitons confined in CuCl quantum dots", *Phys. Stat. Solidi C* **238**, 1275 (2003).
6. A. N. Kapitonov, U. Woggon, K. Leonardi, D. Hommel, K. Edamatsu, and T. Itoh, "Exciton-phonon interaction in epitaxial CdSe/ZnSe nanostructures", *Phys. Stat. Solidi B* **238**, 317 (2003).
7. R. Shimizu, K. Edamatsu, and T. Itoh, "Quantum diffraction and interference of spatially correlated photon pairs generated by spontaneous parametric down-conversion", *Phys. Rev. A* **67**, 041805(R) (2003).

2004 年

8. T. Iida and H. Ishihara, "Radiation Force Induced by Resonant Light, from Atom to Nanoparticle", *J. Lumin.* **108**, 351 (2004).
9. T. Iida and H. Ishihara, "Mechanical Interaction between Nano Objects Induced by Resonant Light", *IQEC Technical Digest, IWG2* (2004).
10. H. Ishihara, J. Kishimoto, and K. Sugihara, "Anomalous mode structure of a radiation-exciton coupled system beyond the long-wavelength approximation regime", *J. Lumin.* **108**, 342 (2004).
11. H. Ishihara and S. Yagaki, "Drastic control of the radiative lifetime of nondipole-type excitons by manipulating the spatial structure of the radiation field", *IQEC Technical Digest, IWA10* (2004).
12. H. Ishihara and H. Mifune, "Degenerate four-wave-mixing of spiral-type

excitons ” , Nonlinear Optics, Materials, Fundamentals and Applications on CDROM (The Optical Society of America, Washington, DC, 2004), TuC3.

13. K. Koshino and H. Ishihara, “ Two-photon nonlinearity in general cavity QED systems ” , Phys. Rev. A **70**, 013806 (2004).
14. K. Koshino, “ Quantum anti-Zeno effect by false measurements ” , Phys. Rev. Lett. **93**, 030401 (2004).
15. K. Koshino and H. Ishihara, “ Evaluation of Two-photon nonlinearity by Semiclassical Method ” , Phys. Rev. Lett. **93**, 173601 (2004).
16. K. Koshino and H. Ishihara, “ Theoretical study on two-photon nonlinearity in atom-cavity systems ” , Nonlinear Optics, Materials, Fundamentals and Applications on CDROM (The Optical Society of America, Washington, DC, 2004), WD21.
17. A. Syouji, B. P. Zhang, Y. Segawa, J. Kishimoto, H. Ishihara and K. Cho, “ Interchange of quantum states of confined excitons caused by radiative corrections in CuCl films ” , Phys. Rev. Lett. **92**, 257401 (2004).
18. K. Miyajima, K. Edamatsu and T. Itoh, “ Infrared transient absorption and excited-states of excitons and biexcitons confined in CuCl quantum dots ” , J. Lumin. **108**, 371 (2004).
19. K. Edamatsu, G. Oohata, R. Shimizu, and T. Itoh, “ Generation of ultraviolet entangled photons in a semiconductor ” , Nature **431**, 167-170 (2004)

2005 年

20. H. Ajiki, “ Validity of Semiclassical Treatment of optical response of cavity systems ” , Phys. Rev. B **71**, 125302 (2005).
21. H. Ajiki, “ Optimal Conditions for Achieving Strong Third-Order Nonlinearity in Semiconductor Cavities ” , J. Phys. Soc. Jpn. **74**, 2929 (2005).
22. H. Ajiki, “ Parameters of a driven Jaynes-Cummings Hamiltonian ” , J. Opt. B, Quantum Semiclass. Opt. **7**, 29 (2005).
23. H. Ajiki, “ Enhancement of Nonlinearity due to Cavity Effect of a Quantum Dot ” , IEICE Transactions **E88-C**, 1803 (2005).
24. H. Ajiki, “ Optimal Condition for Large Optical Nonlinearity of Cavity Systems ” , Proc. of Lasers and Electro-Optics European Quantum Electronics Conf. Munich, EJ-2 (2005).
25. H. Ajiki, “ Validity of Semiclassical Treatment of Optical Nonlinearity ” , Proc. of Int. Quantum Electronics Conference, Tokyo, CWAB3-P46 (2005).

26. T. Iida and H. Ishihara, "Optically-induced force between nano-particles irradiated by electronic resonant light", *J. Lumin.* **112**, 151 (2005) .
27. T. Iida and H. Ishihara, "Optically-induced mechanical interaction between semiconductor quantum dots under an electronic resonance condition", *Physica E* **26**, 163 (2005).
28. T. Iida and H. Ishihara, "Optical manipulation of nano materials under quantum mechanical resonance conditions", *IEICE Transactions* **E88-C**, 1809 (2005).
29. T. Iida and H. Ishihara, "Control of Polaritonic Molecule Formation in a Quantum-Dot Pair by Radiation Force", *Proc. of Lasers and Electro-Optics European Quantum Electronics Conf. Munich*, EI3-3-WED (2005).
30. H. Ishihara, H. Mifune and T. Nakatani, "Linear and Nonlinear Optical Response of Spiral-type Excitons", *J. Lumin.* **112**, 465 (2005).
31. T. Kaneno, H. Ajiki and H. Ishihara, "Interaction between Radiation and a Single Excitonic State Widely Extended in a Shell Structure", *Proc. of Lasers and Electro-Optics European Quantum Electronics Conf. Munich*, EI-3-2 (2005).
32. K. Koshino, "Relation between conventional and dynamical formalisms in the quantum Zeno effect", *Phys. Rev. A* **71**, 034104 (2005).
33. K. Koshino and H. Ishihara, "Two-photon nonlinearity by an excitonic system placed in a cavity", *Phys. Rev. A* **71**, 063818 (2005).
34. K. Koshino and H. Ishihara, "Drastic effects of damping mechanisms on the third-order optical nonlinearity in the optical response of a superradiant system", *J. Phys. Soc. Jpn.* **74**, 2921 (2005).
35. K. Koshino and H. Ishihara, "Nonlinear phase shift in two-photon wavefunction implemented by two-level systems placed in a cavity", *IQEC/CLEO-PR Technical Digest*, QFD1-4 (2005).
36. K. Koshino and H. Ishihara, "Nonlinear interaction between two photons mediated by nonlinear media embedded in a cavity", *Proc. of Lasers and Electro-Optics European Quantum Electronics Conf. Munich*, EG-7 (2005).
37. M. Ichimiya, M. Hasegawa, H. Ishihara, M. Ashida and T. Itoh, "Enhancement of Degenerate Four-Wave Mixing Signal in CuCl Nanostructures with High Crystalline Quality", *IQEC/CLEO-PR Technical Digest*, JWAB3-P1 (2005).
38. Y. Kagotani, K. Miyajima, G. Oohata, S. Saito, M. Ashida, K. Edamatsu and T. Itoh, "Two-photon absorption and lasing due to biexciton in CuCl quantum dots", *J. Lumin.* **112**, 113 (2005).
39. K. Miyajima, G. Oohata, Y. Kagotani, M. Ashida, K. Edamatsu and T. Itoh, "Two-Photon Excitation of Confined Biexcitons in CuCl Quantum Dots", *Physica*

E **26**, 33 (2005).

40. K. Miyajima, Y. Kagotani, S. Saito, M. Ashida and T. Itoh, "Highly Efficient Biexcitonic Lasing of Semiconductor Quantum Dots under Resonant Two-Photon Excitation", IQEC/CLEO-PR Technical Digest, JTuH1-3 (2005).
41. G. Oohata, Y. Kagotani, K. Miyajima, M. Ashida, S. Saito, K. Edamatsu and T. Itoh, "Stable biexcitonic lasing of CuCl quantum dots under two-photon resonant excitation", Physica E **26**, 347 (2005).
42. T. Isu, K. Akiyama, N. Tomita, T. Nishimura, Y. Nomura, "Ultrafast Optical Gate Switch of AlGaAs/AlAs Multi-Layer Structure Using Enhanced Nonlinear Response at Two-Photon Resonance", Institute of Physics Conference Series No. **184**, (IOP Publishing Ltd.), 119 (2005).
43. M. Sasaki, A. Hasegawa, J. Ishi-Hayase, Y. Mitsumori and F. Minami, "Theory of multiwave mixing and decoherence control in a qubit array system", Phys. Rev. B **71**, 165314 (2005).
44. G. Oohata and K. Edamatsu, "Generation of entangled photons from biexcitons in a semiconductor", Proc. SPIE **5631**, 20-23 (2005)
45. G. Oohata, R. Shimizu, and K. Edamatsu, "Generation of entangled photons via biexciton-resonant hyper-parametric scattering", Proc. SPIE **5721**, 15-18 (2005)

2006 年

46. H. Ajiki, T. Kaneno and H. Ishihara, "Vacuum-field Rabi splitting in semiconducting core-shell microsphere", Phys. Rev. B **73**, 155322 (2006).
47. H. Ajiki and H. Ishihara, "Enhanced generation of entangled-photon pairs from a cavity system", Phys. Stat. Solidi C **3**, 2440 (2006).
48. H. Ajiki and H. Ishihara, "Cavity Effect on Generation of Entangled-Photon Pairs from Biexcitons", Conference on Lasers and Electro-Optics/Quantum Electronics and Laser Science Conference and Photonic Applications Systems Technologies 2006 Technical Digest (Optical Society of America, Washington, DC, 2006), JtuD85.
49. M. Bamba, and H. Ishihara, "Entangled-photon generation via biexcitons in nano-structures", Phys. Stat. Solidi C **3**, 3460 (2006).
50. M. Bamba, and H. Ishihara, "Entangled-Photon Generation via Biexcitons in Semiconductor Nano-Structures", Conference on Lasers and Electro-Optics/Quantum Electronics and Laser Science Conference and Photonic Applications Systems Technologies 2006 Technical Digest (Optical Society of America, Washington, DC, 2006), JtuD4.
51. T. Iida and H. Ishihara, "Force control between quantum dots by light in polaritonic molecule states", Phys. Rev. Lett. **97**, 117402 (2006).

52. T. Iida and H. Ishihara, "Force Control between Nanostructures by Coupling of Spatially Separated Polaritons", *Phys. Stat. Solidi C* **3**, 3543 (2006).
53. T. Iida and H. Ishihara, "Collective Effects in Radiation Force on Movable Quantum Dots", *Phys. Stat. Solidi B* **243**, 3946 (2006).
54. H. Ishihara, "Drastic size effects in light-matter interactions due to long-range excitonic coherence", *Laser Physics* **16**, 232 (2006).
55. K. Koshino, "Evaluation of cavity quantum electrodynamics parameters for a planar-cavity geometry", *Phys. Rev. A* **73**, 053814 (2006).
56. K. Koshino, "Semiclassical evaluation of two-photon cross-Kerr effect", *Phys. Rev. A* **74**, 053818 (2006).
57. K. Koshino, "Squeezing in the output field from a one-dimensional atom", *J. Phys. B* **39**, 4853 (2006).
58. M. Ashida, K. Inaba and T. Itoh, "Optical manipulation of semiconductor quantum dots in superfluid helium", *Proceedings of SPIE, the Physics and Simulation of Optoelectronic Devices XV*, 6468-41 (2007).
59. M. Ichimiya, T. Horii, T. Hirai, Y. Sawada, M. Minamiguchi, N. Ohno, M. Ashida and T. Itoh, "Nano-scale distribution of ZnO free exciton luminescence in ZnO,Zn microcrystals and its modification under electron beam excitation", *J. Phys., Condens. Matter* **18**, 1967 (2006).
60. M. Ichimiya, M. Ashida, H. H. Yasuda, H. Ishihara and T. Itoh, "Ultrafast degenerate four-wave mixing in CuCl ultrathin films", *Phys. Stat. Solidi B* **243**, 3800 (2006).
61. M. Ichimiya, Y. Sawada, M. Ashida and T. Itoh, "Free exciton luminescence of ZnO,Zn microcrystals under electron beam excitation", *Phys. Stat. Solidi C* **3**, 1189 (2006).
62. K. Inaba, K. Imaizumi, K. Katayama, M. M. Ichimiya, M. Ashida, T. Iida, H. Ishihara and T. Itoh, "Optical manipulation of CuCl nanoparticles under excitonic resonance condition in superfluid helium", *Phys. Stat. Solidi B* **243**, 3829 (2006).
63. Y. Sawada, M. M. Ichimiya, M. Ashida, S. Shimomura, S. Hiyamizu and T. Itoh, "Cathodoluminescence properties of GaAs/AlGaAs pyramidal cap structures with high spatial resolution", *Phys. Stat. Solidi C* **3**, 3553 (2006).
64. T. Isu, K. Akiyama, N. Tomita, T. Nishimura, Y. Nomura and K. Kanamoto, "Optical Kerr gate switching of AlGaAs/AlAs multilayer structures without pattern effects by the two-photon resonant nonlinear response", *Phys. Stat. Solidi C* **3**, p.671 (2006).

65. J. Inoue, T. Isu, K. Akahane, N. Yamamoto and M. Tsuchiya, "Characterization of highly stacked InAs quantum dots layers on InP substrate for a planar saturable absorber at 1.5 μm band", *Phys. Stat. Solidi C* **3**, p.520 (2006).
66. O. Kojima, T. Isu, J. Ishi-Hayase, and M. Tsuchiya, "Spectrally resolved nonlinear optical response of weakly confined excitons under femtosecond laser pulse excitation in GaAs thin films", *Phys. Stat. Solidi C* **3**, p.675 (2006).
67. J. Inoue, T. Isu, K. Akahane, M. Tsuchiya, "Saturable absorption of highly stacked InAs quantum dots layer in 1.5 μm band", *Applied Physics Letters* **89**, 151117 (2006).
68. K. Arai, T. Kutsuwa, H. Kinjo, K. Ono, H. Kosaka, and K. Edamatsu, "Evaluation of g-factor by quantum transport measurement for photon-spin quantum state transfer", *Phys. Stat. Solidi C* **3**, 4334-4337 (2006)
69. T. Kutsuwa, K. Arai, H. Shigyo, H. Kinjo, K. Ono, Y. Mitsumori, H. Kosaka and K. Edamatsu, "Single photon response in GaAs quantum transport devices for photon-spin quantum state transfer", *Phys. Stat. Solidi C* **3**, 4326-4329 (2006)
70. A. Takamizawa, G. Yonezawa, H. Kosaka, and K. Edamatsu, "Littrow-type external-cavity diode laser with a triangular prism for suppression of the lateral shift of output beam", *Rev. Sci. Instr.* **77**, 046102/1-4 (2006)
71. G. Oohata, R. Shimizu, and K. Edamatsu, "Generation of entangled photons in a semiconductor and violation of Bell's inequality". *Proc. 8th Int. Symp. on Foundations of Quantum Mechanics in the Light of New Technology*, World Scientific, Singapore, 50-53 (2006)
72. R. Shimizu, K. Edamatsu, and T. Itoh, "Quantum diffraction and interference of spatially correlated photon pairs and its Fourier-optical analysis", *Phys. Rev. A* **74**, 013801/1-10 (2006)
73. M. Nakayama, D. Kim, and H. Ishihara, "Center-of-mass quantization of excitons in Pb12 thin films grown by vacuum deposition", *Phys. Rev. B* **74**, 073306 (2006).

2007 年

74. H. Ajiki and H. Ishihara, "Entangled-Photon Generation in Biexcitonic Cavity QED", *J. Phys. Soc. Jpn.* **76**, 053401 (2007).
75. H. Ajiki and H. Ishihara, "Cavity QED Effects on Entangled Photon Generation from a Quantum Dot", *Physica E*, **40**, 371 (2007).
76. H. Ajiki and H. Ishihara, "Photon Blockade Effect on Entangled Photon Generation from a Quantum Dot in Microcavity", *CLEO/Europe-IQEC Technical Digest* (2007)
77. H. Ajiki and H. Ishihara, "Entangled Photon Generation from a V-Type Atom in

Microcavity ” , CLEO/Pacific Rim Technical Digest (2007)

78. T. Iida and H. Ishihara, “ Theoretical study of the resonant-light-induced force microscopy ” , Nanotechnology **18**, 084018 (2007).
79. T. Iida and H. Ishihara, “ Theory of Spectroscopy and Microscopy with Resonant Radiation Force ” , CLEO/Europe-IQEC Technical Digest, JSI19-WED (2007).
80. T. Iida and T. Yoshimizu and H. Ishihara, “ Resonant Radiation Force on a Quantum Dot by Multiple Laguerre-Gaussian Beams ” , CLEO/Pacific Rim Technical Digest, WF2-2 (2007).
81. H. Ishihara, A. Shouji, Y. Segawa, and M. Bamba, “ Anomalous exciton-radiation coupling in the nano-to-bulk crossover regime ” , J. Phys., Condensed Matter **19**, 445008 (2007). [**invited paper**].
82. A. Ishikawa, T. Isu and H. Ishihara, “ Theory of two-photon nonlinearity by a realistic matter system with many degrees of freedom in a cavity ” , CLEO/Europe-IQEC Technical Digest (2007).
83. A. Ishikawa, T. Isu and H. Ishihara, “ Design of a many-atom cavity QED system for the efficient two-photon nonlinearity ” , CLEO/Pacific Rim Technical Digest (2007).
84. K. Koshino, “ Novel Method for Solving the Quantum Nonlinear Dynamics of Photons, Use of a Classical Input ” , Phys. Rev. Lett. **98**, 223902 (2007).
85. K. Koshino, “ Transitional behavior between self-Kerr and cross-Kerr effects by two photons ” , Phys. Rev. A **75**, 063807 (2007).
86. K. Koshino, “ Use of a Classical Input for Solving the Quantum Nonlinear Dynamics of Photons ” , CLEO/Europe-IQEC Technical Digest (2007).
87. H. Oka and H. Ishihara, “ Theory of entangled-photon generation via cavity bipolaritons ” , CLEO/Europe-IQEC Technical Digest (2007).
88. H. Yasuda, M. Ichimiya, M. Ashida, T. Itoh and H. Ishihara, “ Real time analysis of Ultrafast Radiative Decay of Nondipole-Type Excitonic States in a Thin film ” , CLEO/Pacific Rim Technical Digest (2007).
89. M. Ashida, K. Inaba, and T. Itoh, “ Optical manipulation of semiconductor quantum dots in superfluid helium ” , Proceedings of SPIE, the Physics and Simulation of Optoelectronic Devices XV, 6468-41 (2007).
90. H. Minami, M. Kusunoki, M. Minamiguchi, M. Ichimiya, M. Ashida and T. Itoh, “ Modification of photonic band structure in an ordered polystyrene particle layer by controlling interparticle light-mode interaction ” , J. Lumin. **122-123**, 747 (2007).

91. K. Miyajima, M. Ashida, and T. Itoh, "Size-selective excitation of biexcitons in CuCl quantum dots under two-photon resonant excitation", *Phys. Stat. Solidi B* **244**, 3297 (2007).
92. K. Miyajima, M. Ashida, and T. Itoh, "Quantum confined biexcitons in CuCl quantum dots and their unconventional optical properties", *J. Phys., Condensed Matter* **19**, 445006 (2007).
93. O. Kojima, T. Isu, J. Ishi-Hayase, M. Sasaki, and M. Tsuchiya, "Ultrafast nonlinear optical response of weakly confined excitons in GaAs thin films", *Phys. Stat. Solidi C* **4**, 1731 (2007).
94. T. Isu, J. Inoue, K. Akahane, H. Sotobayashi, M. Tsuchiya, "Nonlinear absorption of highly stacked InAs quantum dot layers on an InP(311) substrate", *Proceedings of SPIE* **6393**, 639309 (2007).
95. Kojima, T. Isu, J. Ishi-Hayase, M. Sasaki, and M. Tsuchiya, "Selective generation of quantum beats of weakly confined excitons", *AIP Conference Proceedings* **893**, Physics of Semiconductors, pp.457-458 (2007).
96. O. Kojima, T. Isu, J. Ishi-Hayase, M. Sasaki, and M. Tsuchiya, "Enhancement of nonlinear optical response of weakly confined excitons in GaAs thin films by spectrally rectangle-shape-pulse-excitaton", *Journal of Physics, Conference series*, **61**, pp.618-622 (2007).
97. K. Edamatsu, "Entangled photons, generation, observation and characterization", *Jpn. J. Appl. Phys.* **46**, 7175 (2007) [**invited review paper**].
98. K. Edamatsu, G. Oohata, and R. Shimizu, "Polarization entanglement of photons from a biexciton", *Proc. 8th Int. Conf. on Quantum Communication, Measurement and Computing*, 1 (2007).
99. H. Kosaka, T. Kutsuwa, K. Arai, Y. Rikitake, K. Ono, H. Imamura, T. Takagahara, Y. Mitsumori, and K. Edamatsu, "A quantum device interfacing photons and spins for quantum repeaters", *Proc. Int. Conf. Phys. Semicond.* **28**, 1099 (2007).
100. H. Kosaka, T. Kutsuwa, K. Arai, Y. Rikitake, K. Ono, H. Imamura, T. Takagahara, Y. Mitsumori, and K. Edamatsu, "Quantum state transfer from a photon to an electron spin for building a quantum repeater", *Proc. 8th Int. Conf. on Quantum Communication, Measurement and Computing*, 575 (2007).
101. N. Matsuda, R. Shimizu, Y. Mitsumori, H. Kosaka, and K. Edamatsu, "Lossless all-optical phase gate using a polarization-division sagnac interferometer applicable to a waveguide-type kerr medium", *Appl. Phys. Lett.* **91**, 171119 (2007).
102. S. Nagano, R. Shimizu, Y. Sugiura, K. Suizu, K. Edamatsu, and H. Ito, "800-nm band cross-polarized photon pair source using type-II parametric down-conversion in periodically poled lithium niobate", *Jpn. J. Appl. Phys.*

44, L1064 (2007).

103. G. Oohata, R. Shimizu, and K. Edamatsu, "Photon polarization entanglement induced by biexciton, experimental evidence for violation of Bell's inequality", *Phys. Rev. Lett.* **98**, 140503 (2007)
104. R. Shimizu, T. Yamaguchi, Y. Mitsumori, H. Kosaka, and K. Edamatsu, "Generation of polarization entangled photons using a spatial correlation in spontaneous parametric down-conversion", *Proc. 8th Int. Conf. on Quantum Communication, Measurement and Computing*, 43 (2007).
105. M. Nakayama, T. Nishioka, S. Wakaiki, G. Oohata, K. Mizoguchi, D. Kim, and K. Edamatsu, "Observation of biexciton-resonant hyper-parametric scattering in SiO₂/CuCl layered structures", *Jpn. J. Appl. Phys.* **46**, L234 (2007)

2008 年

106. M. Bamba, and H. Ishihara, "QED theory for excitons with microscopic nonlocality", *Phys. Stat. Solidi C* (to be published).
107. K. Koshino, "Single-photon filtering by a cavity-QED system", *Phys. Rev. A* (to be published).
108. H. Oka, and H. Ishihara, "Effects of unbound two-exciton states on entangled photons generated from a cavity biexciton", *Phys. Stat. Solidi C* (to be published).
109. H. Yasuda, M. M. Ichimiya, Ashida, T. Itoh and H. Ishihara, "Real time analysis of nonlinear transient response of weakly confined excitons", *J. Lumin.* (to be published)
110. M. Ichimiya, M. Ashida, H. Yasuda, H. Ishihara and T. Itoh, "Femtosecond-class radiative decay of multinode-type excitons in nano-to-bulk crossover regime", *J. Lumin.* (to be published).
111. Kanno, R. Katouf, O. Kojima, J. Ishi-Hayase, M. Tsuchiya and T. Isu, "Ultrafast Optical Kerr Effect of Excitons Weakly Confined in GaAs Thin Films", *Phys. Stat. Solidi C*, **5**, 360 (2008).
112. Kanno, R. Katouf, O. Kojima, J. Ishi-Hayase, M. Sasaki, M. Tsuchiya and T. Isu, "Photoluminescence Dynamics of weakly confined Excitons in GaAs Thin Films", *J. Lumin.* (to be published).
113. O. Kojima, T. Isu, J. Ishi-Hayase, A. Kanno, R. Katouf, M. Sasaki, and M. Tsuchiya, "Decay of Orientational Grating of Weakly Confined Excitons in GaAs Thin Films", *J. Lumin.* (to be published).
114. O. Kojima, T. Isu, J. Ishi-Hayase, A. Kanno, R. Katouf, M. Sasaki, and M. Tsuchiya, "Effects of Excitation Spectral Width on Decay Profile of Weakly

Confined Excitons ” , J. Lumin. (to be published).

115. O.Kojima, T.Isu, J.Ishii-Hayase, M.Sasaki, R.Katouf, M.Tsuchiya “ Spectral Width Dependence of Residual Carrier Effect on Nonlinear Optical Response of Weakly Confined Excitons ” , Phys. Stat. Solidi C **5** (to be published).
116. O. Kojima, T. Isu, J. Ishi-Hayase, A. Kanno, R. Katouf, M. Sasaki, M. Tsuchiya, “ Ultrafast response induced by interference effects between weakly confined exciton states ” , Journal of the Physical Society of Japan **77** (to be published).

(2) その他の著作物（総説、書籍など）(21件)

2003年

1. 枝松圭一, 清水亮介, “非線形光学結晶を用いた量子もつれ合い光子対の発生と二光子干渉”, 固体物理 **38**, 471-477 (2003).

2004年

2. H. Ishihara, “ Anomalous size dependence of optical nonlinearities due to the excitonic coherence ” , Journal of Physics, Condensed Matter, volume **16**, R247 (2004) [**Invited Review**].
3. K. Edamatsu and T. Itoh, “ CuCl quantum dots ” , Encyclopedia of Nanoscience and Nanotechnology, **10**, 1-11 (2004)
4. 石原 一, “内部電場のナノ空間構造を利用した新しい光機能デザイン”, 応用物理 **73** 764 (2004).
5. 枝松圭一, “光物性の基礎と応用第4回・吸収と反射スペクトル”, オプトロニクス **23**, 177-185 (2004).
6. 清水亮介, 枝松圭一, “量子もつれ光子対の回折・干渉と量子リソグラフィー”, 光学 **33**, 291-293 (2004).

2005年

7. 飯田 琢也, 石原 一, “量子ドット対の間に生じる共鳴光誘起力学的相互作用”, 物性研究 **84**, 研究会報告”量子系およびマクロ系におけるカオスと非線形動力学” (物性研究刊行会, 2005), p.380.
8. 石原 一, “光物性の基礎と応用 第18回 ”物質・現象・新技術(6)フォトニック結晶”“, 月刊オプトロニクス 6月号 (株式会社オプトロニクス, 2005).
9. 枝松圭一, “量子情報通信と半導体量子光学”, 学術月報 **58**, No.4, 36-40 (2005).
10. 枝松圭一, 大島悟郎, “半導体へのレーザー照射による量子もつれ光子対発生”, レーザ加工学会誌 **12**, No. 2, 109-111 (2005).

11. 枝松圭一, 大畠悟郎, 清水亮介, “量子もつれ光子対と量子干渉実験”, *O plus E* **27**, No. 6, 622-628 (2005).
12. 枝松圭一, 大畠悟郎, 清水亮介, “量子もつれ光子対”, *光技術コンタクト* **43**, No.7, 376-383 (2005).
13. 枝松圭一, 大畠悟郎, “半導体を用いた量子もつれ光子対の発生”, *オプトロニクス* **24**, No.9, 145-149 (2005).
14. 枝松圭一, “量子もつれ”, *光科学研究の最前線*, 18-19, “光科学研究の最前線”編集委員会編, 強光子場科学研究懇談会 (2005).
15. 大畠悟郎, 枝松圭一, “半導体の励起子分子を用いた量子もつれ光子対の生成”, *日本物理学会誌* **60**, No. 5, 359-362 (2005).

2006年

16. K. Koshino. and H. Ishihara, “Two-photon nonlinear interaction mediated by cavity quantum electrodynamics systems,” *International Journal of Modern Physics B* **20**, 2451 (2006). [**Invited Review**]
17. 枝松圭一, “吸収と反射スペクトル”, *光物性の基礎と応用*, 41-60, 光物性研究会組織委員会編, オプトロニクス社 (2006).
18. 枝松圭一, 大畠悟郎, “半導体量子もつれ光子源”, *量子情報通信*, 260-267, 佐々木雅英・松岡正浩監修, オプトロニクス社 (2006).

2007年

19. K. Edamatsu, “Entangled photons via biexciton-resonant hyperparametric scattering”, *Semiconductor Qubits* (World Scientific, Singapore), Chap. 14 (in press)
20. 枝松圭一, “単一光子発生・検出”, *表面物性工学ハンドブック第2版*, 645-467, 小間篤, 青野正和, 石橋幸治, 塚田捷, 常行真司, 長谷川修司, 八木克道, 吉信淳 編, 丸善 (2007).
21. 枝松圭一, “量子もつれ光子の発生と検出”, *オプトロニクス* **26**, No. 4, 232-239 (2007).

(3) 学会発表(国際学会発表及び主要な国内学会発表)

招待講演

(国内会議 32 件、国際会議 25 件)

1. 国際会議

2003年

- 1) H. Ishihara, "Anomalous Size Dependence of Linear and Nonlinear Optical Responses due to the Long-range Excitonic Coherence", CREST & QNN 03 Joint International Workshop, (in Yumebutai Awaji, Japan, 2003/7/21 ~ 7/23) [**Keynote**].
- 2) K. Edamatsu, R. Shimizu, and T. Itoh, "Quantum interferometry with entangled photon pairs", The 8th International Symposium on Advanced Physical Fields Advanced Materials for Quantum Computing, Tsukuba, Japan, Jan. 14-17, 2003.
- 3) K. Edamatsu, G. Oohata, R. Shimizu, and T. Itoh, "Generation of entangled photon pairs through hyper-parametric scattering in a semiconductor", Photonics and Spintronics in Semiconductor Nanostructures (PSSN2003), Kyoto, Japan, Nov. 2-3, 2003.

2004 年

- 4) H. Ishihara, "Manipulation of light-matter interaction via nanoscale spatial structure of the internal field", International Workshop on Materials Science and Nano-Engineering, (Icho Kaikan, Osaka University, Japan, 2004/12/11 ~ /12/14).
- 5) K. Edamatsu, "Generation of entangled photons from a semiconductor", Japan-Germany Colloquium 2004 --Quantum Optics, Wildbad, Germany, Feb. 9--11, 2004
- 6) K. Edamatsu, "Generation and interferometry of entangled photons", Japanese-American Frontiers of Science Symposium, Irvine, U.S.A., Dec. 10--12, 2004
- 7) G. Oohata and K. Edamatsu, "Generation of entangled photons from biexcitons in a semiconductor", SPIE Photonics Asia, Beijing, China, Nov. 10--12, 2004

2005 年

- 8) H. Ishihara, "Drastic size effects in light-matter interaction due to long-range excitonic coherence", 14th International Laser Physics Workshop (July 4-8, 2005, Kyoto, Japan).
- 9) T. Itoh, Y. Kagotani, K. Miyajima, M. Ashida, and S. Saito, "Efficient Lasing of confined exciton systems in semiconductor quantum dots", 14th International Laser Physics Workshop (Kyoto, July 4-8, 2005).
- 10) T. Itoh, "Excited state processes in electronic and bio nanomaterials, Biexciton Lasing in CuCl Quantum Dots and Its Characteristic Mechanism", Center for Nonlinear Studies Conference 2005, (Los Alamos, August 8-11, 2005).
- 11) T. Itoh, "Two-photon resonant excitation of confined biexcitons in CuCl quantum dots and their subsequent ultrafast radiative decay capable of efficient lasing", Material Research Society Fall Meeting 2005 (November 28-December 2, 2005, Boston).

- 12) K. Edamatsu, "Generation of entangled photons via biexciton-resonant hyper-parametric scattering", SPIE Photonics West, San Jose, U.S.A., Jan. 24--27, 2005.
- 13) K. Edamatsu, G. Oohata, and R. Shimizu, "Generation of entangled photons via hyper-parametric scattering from a semiconductor", The 14th International Laser Physics Workshop (LPHYS'05), Keihanna (Kyoto), Japan, July 4--8, 2005.
- 14) G. Oohata, R. Shimizu, and K. Edamatsu, "Entangled photon generation via biexciton-resonant hyper parametric scattering in a semiconductor", International Quantum Electronics Conference 2005 (IQEC 2005), Tokyo, Japan, July 11-15, 2005.

2006 年

- 15) T. Isu, J. Inoue, K. Akahane, H. Sotobayashi, and M. Tsuchiya, "Nonlinear absorption of highly stacked InAs quantum dot layers on an InP(311) substrate", SPIE Optics East 2006 (Boston, 2006.10.1-4) Conference 6393-09.
- 16) K. Edamatsu, G. Oohata, and R. Shimizu, "Generation of entangled photons from a biexciton and violation of Bell's inequality", The 4th NIMS International Conference on Photonic Processes in Semiconductor Nanostructures, Tsukuba, Japan, March 8--10, 2006.
- 17) K. Edamatsu, "Entangled photons from semiconductor and violation of Bell's inequality", The 1st International Workshop on Linear Optical Quantum Information Processing, Baton Rouge, U.S.A., April 9-12, 2006.
- 18) K. Edamatsu, G. Oohata, and R. Shimizu, "UV photon entanglement through biexcitonic states", The 7th International Conference on Excitonic Processes in Condensed Matter, Winston-Salem, U.S.A., June 26-30, 2006.
- 19) K. Edamatsu, G. Oohata, and R. Shimizu, "Entangled photons from a semiconductor and violation of Bell's inequality", The 13th International Conference on Superlattices Nanostructures and Nanodevices (ICSNN-2006), Istanbul, Turkey, July 30 to August 4, 2006.
- 20) K. Edamatsu, G. Oohata, and R. Shimizu, "Polarization entanglement of photons from a biexciton", The 8th International Conference on Quantum Communication, Measurement and Computing (QCMC2006), Tsukuba, Japan, November 28 to December 3, 2006.
- 21) R. Shimizu, T. Yamaguchi, Y. Mitsumori, H. Kosaka, and K. Edamatsu, "Generation of polarization entanglement from spatially correlated photon pairs", The 15th International Laser Physics Workshop (LPHYS'06), Lausanne, Switzerland, July 24-28, 2006.

2007 年

- 22) H. Ajiki, "Fine Structure and Optical Spectra of Exciton in a Quantum Dot", Challenges and opportunities in Nano-Optics (Fudan University, Shanghai, China, 5-9 January, 2007).
- 23) H. Ishihara, T. Iida, "Optical manipulation of nanoscale objects", Challenges and opportunities in Nano-Optics (Fudan University, Shanghai, China, 5-9 January, 2007).
- 24) H. Ishihara, "Anomalous radiative correction of multinode-type excitons in nano-to-bulk crossover regime", The First International Conference on Material and Information Sciences in High Technologies, September 26-29, 2007, Baku, Azerbaijan.
- 25) M. Ashida, K. Inaba and T. Itoh, "Optical manipulation of semiconductor quantum dots in superfluid helium", Photonics West 2007, San Jose Convention Center (San Jose, California USA), January 24, 2007.

2. 国内学会

2002年

- 1) 枝松圭一, "レーザーを用いた赤外時間分解分光 - 半導体量子ドットに閉じ込められた励起子の励起状態の研究 -", 分子研研究会 赤外放射光の現状と将来計画, 岡崎, 2002年11月13日.
- 2) 枝松圭一, "パラメトリック光子対を用いた量子干渉実験", 第5回"サイクル時間域光波制御と単一原子分子現象への応用"研究会, 支笏湖, 2002年11月21日.
- 3) 枝松圭一, "光を用いた量子計算", 東北大学電気通信研究所大規模量子計算研究会, 仙台, 2002年12月18日.

2003年

- 4) 石原 一, "物質コヒーレンスに起因する新しいナノ光学現象", ナノ学会創立大会 シンポジウム "先鋭化するナノ研究戦略" (神戸大学 2003年5月29日).
- 5) 石原 一, "ナノ微粒子の量子力学的コヒーレンスを利用した光マニピュレーション", 日本物理学会 2003年秋期大会 (岡山大学).
- 6) 枝松圭一, 大畠悟郎, 伊藤正, "半導体の励起子分子共鳴ハイパーパラメトリック散乱による量子もつれ合い光子対の生成", 科学研究費補助金企画調査シンポジウム - 固体中の光学過程による量子計算の可能性 -, つくば, 2003年8月18日.
- 7) 枝松圭一, "パラメトリック下方変換光子対による量子回折・干渉実験", 日本物理学会 2003年秋季大会招待講演, 岡山, 2003年9月21日.
- 8) 枝松圭一, 大畠悟郎, 清水亮介, 伊藤正, "二光子量子もつれ状態と量子干渉", 物性研短期研究会"短波長光などのコヒーレンスの生成・消滅に関する新しい知見と構想", 柏,

2003年11月15日.

2004年

- 9) 石原 一, “内部電場のナノ空間構造に基づく光機能デザイン”, 日本学術振興会 アモルファス・ナノ材料第147委員会研究会 2004年3月4日 千里ライフサイエンスセンタービル.
- 10) 石原 一, “光電場のナノ空間構造による新しい光機能とその応用”, 2004年春季 第51回応用物理学関係連合講演会.
- 11) 枝松圭一, “光の量子状態と量子情報・量子計算”, 第2回量子情報と量子計算仙台研究会, 仙台, 2004年2月19日.
- 12) 枝松圭一, “量子もつれ光子対の発生と量子干渉”, 原子衝突研究協会第29回研究会, 仙台, 2004年8月5日.
- 13) 枝松圭一, “励起子光物性と量子情報”, 第15回光物性研究会, 京都, 2004年12月3-4日.
- 14) 枝松圭一, “半導体の励起子分子を用いた量子もつれ光子対の生成”, 筑波大学大学院物質創成先端科学研究科・半導体量子エレクトロニクスセミナー, つくば, 2004年12月21日.

2005年

- 15) 安食博志, “理想的なナノチューブの電子状態と磁場下での変調”, 日本物理学会 2005年春季 第60回年次大会(東京理科大学)平成16年3月24日 シンポジウム”カーボンナノチューブ研究最前線”.
- 16) 越野和樹, “共振器 - ナノ構造結合系における2光子間非線形性の理論”, 2005年3月25日, 日本物理学会第60回年次大会, 東京理科大学野田キャンパス.
- 17) 枝松圭一, “半導体光物性から量子情報通信へのアプローチ”, 日本物理学会第60回年次大会シンポジウム, 野田, 2005年3月25日.
- 18) 枝松圭一, 大畠悟郎, 清水亮介, “半導体の励起子分子を用いた量子もつれ光子対の生成”, 第12回量子情報技術研究会 (QIT12), 厚木, 2005年5月13日.
- 19) 枝松圭一, “もつれた光, その物理と量子情報”, 理科学の最前線(東北大学大学院理学研究科物理学教室セミナー), 仙台, 2005年6月24日.
- 20) 枝松圭一, “半導体の励起子分子を用いた量子もつれ光子対の生成”, 文部科学省ITプログラム”光・電子デバイス技術の開発”第27回プロジェクト研究推進会議, 東京, 2005年7月27日.
- 21) 枝松圭一, “半導体の励起子分子を用いた量子もつれ光子対の生成”, 京都大学大学院物理学教室談話会, 京都, 2005年10月13日.
- 22) 大畠悟郎, “半導体による量子もつれ光子の発生”, 日本物理学会第60回年次大会シンポ

ジウム,野田,2005年3月25日.

2006年

- 23) 石原一, “輻射場の微視的空間構造とナノ光学応答”, 第1回 光-分子強結合反応場シンポジウム 平成18年3月6日 日本科学未来館
- 24) 井須俊郎, 小島 磨, 早瀬(伊師)潤子, 佐々木雅英, 土屋昌弘, “GaAs 薄膜中の弱閉じ込め励起子の超高速非線形光学応答”, 応用物理学会中国四国支部学術講演会(徳島大学, 2006.7.29) B-p-1, p.124.
- 25) 枝松圭一, “半導体を用いた単一光子,量子もつれ光子の発生と量子情報通信”, 日本学術振興会未踏ナノデバイステクノロジー第151委員会第75回研究会, 志摩, 2006年2月3日-4日.
- 26) 枝松圭一, “半導体を用いた量子もつれ光子の発生とベルの不等式の破れ”, 東京工業大学21世紀COEプログラム”ナノ量子物理学”第2回公開シンポジウム, 東京, 2006年3月16日-17日.
- 27) 枝松圭一, “半導体を用いた量子もつれ光子の発生と、量子もつれ光子を用いた量子回折・干渉実験”, 日本オプトメカトロニクス協会”もつれフォトン・生成と光学への応用”セミナー, 東京, 2006年12月7日.

2007年

- 28) 飯田琢也, “光 物質複合状態励起によるナノ物質の力学的制御”, 第三回 大阪大学21世紀 COE 若手研究会 ~ 物質科学の未来に向けて ~ (於,大阪大学中之島センター 2007/3/12).
- 29) 石原一, “光と分子系の空間的インタープレイによる光応答制御”, 日本化学会第87春季年会(2007)特別企画講演(関西大学 平成19年3月25日(日)~28日(水)).
- 30) 石原一, “不均一電磁場による分子励起状態の制御”, Optics & Photonics Japan 2007 シンポジウム「プラズモニクスとその分子制御への展開」(2007年11月27日, 大阪大学コンベンションセンター)
- 31) 稲葉和宏, 今和泉啓, 片山浩一, 一宮正義, 芦田昌明, 飯田琢也, 石原一, 伊藤正, “超流動ヘリウム中におけるCuCl量子ドットの作製および光マニピュレーション”, 第54回応用物理学関係連合講演会 講演奨励賞受賞記念講演 (於,青山学院大学 相模原キャンパス 2007/3/27~3/30).
- 32) 枝松圭一, “量子もつれ光子の発生とその評価”, 第9回分子ダイナミック分光ワークショップ”生体・人工系の量子状態ダイナミクス 量子情報の制御と可視化”, 浜松, 2007年7月6日.

口頭発表 (国内会議128件、国際会議54件)

1. 国際会議

2003 年

- 1) T. Iida and H. Ishihara, "Radiation force induced by resonant light, From atom to nanoparticle", International Conference on Dynamical Processes in Excited States of Solids, (DPC '03), (in Christchurch, New Zealand, 2003/8/03 ~ /8/08).
- 2) H. Ishihara, J. Kishimoto, and K. Sugihara, "Anomalous mode structure of radiation-exciton coupled system beyond long wavelength approximation regime", International Conference on Dynamical Processes in Excited States of Solids, (DPC '03), (in Christchurch, New Zealand, 2003/8/03 ~ /8/08).
- 3) T. Isu, K. Akiyama, N. Tomita, Y. Nomura, H. Ishihara, and K. Cho, "Highly-efficient and ultrafast nonlinear optical response of excitons weakly confined in a semiconductor thin film", CREST & QNN 03 Joint International Workshop, (Yumebutai Awaji, Japan, 2003/7/21 ~ 7/23) Tu3-2.
- 4) K. Edamatsu, G. Oohata, and T. Itoh, "Generation of entangled photon pairs in semiconductors", CREST and QNN'03 Joint International Workshop, Awaji, Japan, July 21-23, 2003.
- 5) K. Edamatsu and R. Shimizu, "Quantum diffraction and interference of spatially correlated photon pairs", SPIE s 48th Annual Meeting, San Diego, U.S.A., August 6, 2003.
- 6) R. Shimizu, K. Edamatsu, and T. Itoh, "Diffraction and interference of entangled photon pairs generated by parametric down-conversion, a spatial correlation effect", European Quantum Electronics Conference 2003, Munich, Germany, June 22-29, 2003.

2004 年

- 7) T. Iida and H. Ishihara, "Mechanical Interaction between Nano Objects Induced by Resonant Light", International Quantum Electronics Conference (San Francisco, 2004).
- 8) T. Iida and H. Ishihara, "Mechanical interaction between nano objects induced by resonant light", International Quantum Electronics Conference (IQEC 2004), (in Moscone Center West, San Francisco California USA, 2004/5/16 ~ /5/21).
- 9) T. Iida and H. Ishihara, "Optically-induced force between nano-particles irradiated by electronic resonant light", The 6th International Conference on Excitonic Processes in Condensed Matter (EXCON 2004), (in Jagiellonian University, Cracow Poland, 2004/7/06 ~ /7/09).
- 10) H. Ishihara and H. Mifune, "Degenerate four-wave-mixing of spiral-type excitons", Nonlinear Optics Topical Meeting, (Hawaii Island, 2004).
- 11) Y. Kagotani, K. Miyajima, G. Oohata, and S. Saito, M. Ashida, K. Edamatsu, T.

Itoh, "Two-photon absorption and lasing due to biexciton in CuCl quantum dots", Excitonic Process in Condensed Matter (Cracow, Poland, July 6-9, 2004).

- 12) K. Miyajima, G. Oohata, Y. Kagotani, S. Saito, M. Ashida, K. Edamatsu, and T. Itoh, "Two-photon excitation of biexcitons and their lasing in semiconductor quantum dots", International Quantum Electronics Conference 2004 (San Francisco, May 16-22, 2004).
- 13) K. Miyajima, Y. Kagotani, G. Oohata, S. Saito, M. Ashida, K. Edamatsu, and T. Itoh, "Two-photon Excitation of Biexcitons and Their Lasing in Semiconductor Nanocrystals", Asia Pacific Physics Conference (Hanoi, Vietnam, October 25-31, 2004).
- 14) G. Oohata, Y. Kagotani, K. Miyajima, S. Saito, M. Ashida, K. Edamatsu, and T. Itoh, "Stable Biexcitonic Lasing of CuCl Quantum Dots Under Two-Photon Resonant Excitation", G. Oohata, Quantum Dots 2004 (Banff, Canada, May 10-13, 2004).
- 15) T. Isu, K. Akiyama, N. Tomita, T. Nishimura, and Y. Nomura, "Ultrafast Optical Gate Switch of AlGaAs/AIAs Multi-Layer Structure Using Enhanced Nonlinear Response at Two-Photon Resonance", The 31th International Symposium on Compound Semiconductors, MP-31, p.101, (Seoul, Korea, 2004/9/12~9/16).

2005 年

- 16) H. Ajiki, "Validity of Semiclassical Treatment of Optical Nonlinearity", International Quantum Electronics Conference 2005 (July 11-15, 2005, Tokyo, Japan).
- 17) T. Iida and H. Ishihara, "Control of polaritonic molecule formation in a quantum dot pair by radiation force", *European Quantum Electronics Conference (EQEC2005)* (June 12- 17, 2005, Munich ICM International Congress Centre, Munich Germany).
- 18) T. Iida and H. Ishihara, "Radiation Force Exerted on Plural Quantum Dots under Optical Excitation of Their Coherently-coupled States", *The 5th Asia-Pacific Conference on Near-Field Optics (APNF05)* (November 15- 17, 2005, TOKI MESSE, Niigata Convention Center, Niigata Japan).
- 19) T. Kaneno, H. Ajiki, and H. Ishihara, "Interaction between Radiation and a Single Excitonic State Widely Extended in a Shell Structure", *European Quantum Electronics Conference (EQEC2005)* (June 12- 17, 2005, Munich ICM International Congress Centre, Munich Germany).
- 20) K. Koshino and H. Ishihara, "Nonlinear phase shift in two-photon wavefunction implemented by two-level systems placed in a cavity", IQEC/CLEO-PR, Technical Digest, QFD1-4 (2005).
- 21) M. Ichimiya, H. Ishihara, M. Ashida, and T. Itoh, "Ultrafast degenerate four-wave mixing at confined exciton resonance in CuCl ultrathin films with high

crystalline quality ” , Joint Conference on Ultrafast Optics V and Applications of High Field and Short Wavelength Source XI , September 25-30, 2005, Nara, Japan, W2-7.

- 22) Y. Kagotani, K. Miyajima, S. Saito, M. Ashida, and T. Itoh, “ Temporal Behavior of Biexciton Luminescence Under Strong Two-photon Excitation in CuCl Quantum Dots ” , 15th International Conference on Dynamical Processes in Excited States of Solids, August 1-5, 2005, Shanghai, China, Or Fr C 2.
- 23) K. Miyajima, Y. Kagotani, S. Saito, M. Ashida, and T. Itoh, “ Highly Efficient Biexcitonic Lasing of Semiconductor Quantum Dots under Resonant Two-Photon Excitation ” , International Quantum Electronics Conference 2005 and the Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics 2005, July 11-15, 2005, Tokyo, Japan, JTuH1-3.
- 24) K. Miyajima, Y. Kagotani, M. Ashida, S. Saito, and T. Itoh, “ Two-photon direct generation of biexcitons and their subsequent efficient lasing in CuCl quantum dots ” , 2nd International Conference on Spontaneous Coherence in Excitonic Systems, September 7-10, 2005, Southampton, UK, S2.
- 25) K. Edamatsu, G. Oohata, and R. Shimizu, “ Generation of entangled photons via biexcitons in a semiconductor ” , Quantop Seminar, Niels Bohr Institute, Copenhagen, Denmark, June 10, 2005.
- 26) G. Oohata, R. Shimizu, and K. Edamatsu, “ Entangled-photon generation from biexcitons in a semiconductor ” , European Quantum Electronics Conference 2005, Munich, Germany, June 12-17, 2005.

2006年

- 27) H. Ajiki and H. Ishihara, “ Cavity-QED effect on nonlinear spectra via biexciton of a quantum dot ” , SPIE Symposium on Optoelectronics, (Jan. 21-26, 2006, San Jose).
- 28) H. Ajiki and H. Ishihara, “ Enhanced Generation of Entangled-Photon Pairs from a Cavity System ” , eighth International Workshop on Nonlinear Optics and Excitation in Semiconductors (Feb. 20-24, 2006, Muenster).
- 29) M. Bamba and H. Ishihara, “ Entangled-photon generation via biexcitons in nano-structures ” , 7th International Conference on Excitonic Processes in Condensed Matter (EXCON 2006), Wake Forest University (Winston-Salem, NC USA), June 29, 2006.
- 30) T. Iida and H. Ishihara, “ Force control between nanostructures by coupling of spatially separated polaritons ” , 7th International Conference on Excitonic Processes in Condensed Matter (EXCON 2006), Wake Forest University (Winston-Salem, NC USA), June 29, 2006.
- 31) M. Ichimiya, M. Ashida, H. Yasuda, H. Ishihara, and T. Itoh, “ Ultrafast

degenerate four-wave mixing in CuCl ultrathin films”, 7th International Conference on Excitonic Processes in Condensed Matter (EXCON 2006), Wake Forest University (Winston-Salem, NC USA), June 29, 2006.

- 32) K. Inaba, K. Imaizumi, K. Katayama, M. Ichimiya, M. Ashida, T. Iida, H. Ishihara, and T. Itoh, “Optical manipulation of CuCl nanoparticles under an excitonic resonance condition in superfluid helium”, 7th International Conference on Excitonic Processes in Condensed Matter (EXCON 2006), Wake Forest University (Winston-Salem, NC USA), June 27, 2006.
- 33) Y. Kagotani, K. Miyajima, S. Saito, M. Ashida, and T. Itoh, “Ultrafast response of biexciton luminescence under two-photon resonant excitation in CuCl quantum dots”, 4th International Conference on Semiconductor Quantum Dots (QD2006), Majestic Congress Centre (Chamonix-Mont Blanc, France), May 3, 2006.
- 34) H. Kosaka, T. Kutsuwa, K. Arai, K. Rikitake, K. Ono, H. Imamura, T. Takagahara, Y. Mitsumori, and K. Edamatsu, “Quantum photonics and quantum transport approach for realizing photon-spin quantum state transfer device”, Quantum Electronics and Laser Science Conference 2006, Long Beach, U.S.A., May 22-26, 2006.
- 35) Y. Sawada, M. Ichimiya, M. Ashida, S. Shimomura, S. Hiyamizu, and T. Itoh, “Cathodoluminescence properties of GaAs/AlGaAs pyramidal cap structures with high spatial resolution”, 7th International Conference on Excitonic Processes in Condensed Matter (EXCON 2006), Wake Forest University (Winston-Salem, NC USA), June 27, 2006.
- 36) O. Kojima, T. Isu, J. Ishi-Hayase, M. Sasaki, and M. Tsuchiya, “Enhancement of nonlinear optical response of weakly confined excitons in GaAs thin films by spectrally rectangle-shape-pulse-excitation”, International Conference on Nanoscience and Technology (Basel, 2006.7.30-8.4) No.600, p.164.
- 37) H. Kosaka, T. Kutsuwa, K. Arai, K. Rikitake, K. Ono, H. Imamura, T. Takagahara, Y. Mitsumori, and K. Edamatsu, “Quantum photonics and quantum transport approach for realizing photon-spin quantum state transfer device”, Quantum Electronics and Laser Science Conference 2006, Long Beach, U.S.A., May 21-26, 2006.
- 38) H. Kosaka, T. Kutsuwa, K. Arai, Y. Rikitake, K. Ono, H. Imamura, T. Takagahara, Y. Mitsumori, and K. Edamatsu, “A quantum device interfacing photons and spins for quantum repeaters”, 28th International Conference on the Physics of Semiconductors, Vienna, Austria, July 24-28, 2006.
- 39) H. Kosaka, T. Kutsuwa, K. Arai, Y. Rikitake, K. Ono, H. Imamura, T. Takagahara, Y. Mitsumori, and K. Edamatsu, “Quantum state transfer from a photon to an electron spin for building a quantum repeater”, The 8th International Conference on Quantum Communication, Measurement and Computing (QCMC2006), Tsukuba, Japan, November 28 to December 3, 2006.

- 40) N. Matsuda, R. Shimizu, Y. Mitsumori, H. Kosaka, and K. Edamatsu, "Measurement of weak optical nonlinearity induced by a few photons", The 2nd International Symposium on Bio- and Nano-Electronics in Sendai, Sendai, Japan, December 9-10, 2006.
- 41) R. Shimizu, T. Yamaguchi, Y. Mitsumori, H. Kosaka, and K. Edamatsu, "Generation of polarization entangled photons using a spatial correlation in spontaneous parametric down-conversion", The 8th International Conference on Quantum Communication, Measurement and Computing (QCMC2006), Tsukuba, Japan, November 28 to December 3, 2006.

2007 年

- 42) H. Ajiki and H. Ishihara, "Entangled Photon Generation from a Quantum Dot in Microcavity", Quantum Electronics and Laser Science Conference (QELS), Baltimore, May 8, 2007.
- 43) H. Ajiki and H. Ishihara, "Entangled Photon Generation from a V-Type Atom in Microcavity", The 7th Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO/Pacific Rim 2007), COEX Convention Center, Seoul, Korea, August 26-31, 2007.
- 44) H. Ajiki and H. Ishihara, "Cavity-QED Effects on Entangled Photon Generation from a Quantum Dot", 2nd Int. Symp. On Nanometer-Scale Quantum Physics (nanoPHYS 07) Tokyo, 2007.
- 45) T. Iida, T. Yoshimizu, and H. Ishihara, "Resonant Radiation Force on a Quantum Dot by Multiple Laguerre-Gaussian Beams", The 7th Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO/Pacific Rim 2007) (in COEX Convention Center, Seoul, Korea, August 26-31, 2007).
- 46) A. Ishikawa and H. Ishihara, "Design of a many-atom cavity QED system for the efficient two-photon nonlinearity", The 7th Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO/Pacific Rim 2007) (in COEX Convention Center, Seoul, Korea, August 26-31, 2007).
- 47) H. Yasuda, M. Ichimiya, M. Ashida, T. Itoh, and H. Ishihara, "Real time analysis of Ultrafast Radiative Decay of Nondipole-Type Excitonic States in a Thin film", The 7th Pacific Rim Conference On Lasers and Electro-Optics (CLEO/Pacific Rim 2007), the Convention & Exhibition Center (COEX), (Seoul, Korea).
- 48) Atsushi Kanno, Redouane Katouf, Osamu Kojima, Junko Ishi-Hayase, Masahiro Tsuchiya, and Toshiro Isu, "Ultrafast Optical Kerr Effect of Excitons Weakly Confined in GaAs Thin Films", 15th International Conference on Nonequilibrium Carrier Dynamics in Semiconductors (HCIS15), Tokyo, 2007.7.23-27.
- 49) M. Ichimiya, M. Ashida, H. Yasuda, H. Ishihara, and T. Itoh, "Ultrafast Radiative Decay of Confined Excitons Due to Long-Range Coherent Coupling with

Radiation Wave ” , Conference on Lasers and Electro-Optics/Quantum Electronics and Laser Science Conference (CLEO/QELS 2007) Baltimore Convention Center (Baltimore, Maryland, USA) May 9, 2007.

- 50) K. Inaba, K. Imaizumi, K. Katayama, M. Ichimiya, M. Ashida, T. Iida, H. Ishihara, and T. Itoh, “ Optical fabrication and manipulation of CuCl nanoparticles in superfluid helium ” , 16th International Conference on Dynamical Processes in Excited States of Solids (DPC07) SEK University (Segovia, Spain) June 19, 2007.
- 51) K. Miyajima, Y. Kagotani, K. Sakurai, S. Saito, M. Ashida, and T. Itoh, “ Superfluorescence of Biexcitons in CuCl Quantum Dots under Two-Photon Resonant Excitation ” , Quantum Electronics and Laser Science Conference (Baltimore, MD, U.S.A) Conference on Lasers and Electro-Optics/Quantum Electronics and Laser Science Conference (CLEO/QELS 2007) Baltimore Convention Center (Baltimore, Maryland, USA) May 7, 2007.
- 52) H. Kosaka, H. Shigyo, T. Kutsuwa, Y. Rikitake, H. Imamura, Y. Mitsumori, and K. Edamatsu, “ Toward all semiconductor quantum repeaters ” , Conference on Lasers and Electro-Optics and the Quantum Electronics and Laser Science Conference (CLEO/QELS2007), Baltimore, U.S.A. May 6-11, 2007.
- 53) N. Matsuda, R. Shimizu, Y. Mitsumori, H. Kosaka, and K. Edamatsu, “ Measurement of few-photon optical nonlinearity ” , The Joint international Conference of 4th International Symposium on System Construction of Global-Network-Oriented Information Electronics and Student-Organizing International Mini-Conference on Information Electronics System, Sendai, Japan, January 23-25, 2007.
- 54) N. Matsuda, R. Shimizu, Y. Mitsumori, H. Kosaka, and K. Edamatsu, “ Measurement of optical cross-Kerr nonlinearity induced by a few photons in a photonic crystal fiber ” , The International Quantum Electronics Conference (IQEC), Munich, Germany, June 17-22, 2007.

2. 国内学会

2003年

- 1) 安食博志, Wang Yao, Lu Sham, “ 準キャビティモード模型による透過率と位相シフト, マクスウェル方程式の 解との比較 ”, 日本物理学会 2003 年秋季大会 (岡山大学) 平成15年9月21日.
- 2) 安食博志, Wang Yao, Lu Sham, “ キャビティ内の量子ドットによる非線形位相シフト ”, 日本物理学会 2003 年秋季大会 (岡山大学).
- 3) 安食博志, “ キャビティ中の二準位系における非線形位相シフト ”, “ 固体中の光学過程による量子計算の可能性 ” シンポジウム 独立行政法人 物質・材料研究機構, 2003 年8月19日.
- 4) 岸本潤, 石原一, “ 薄膜中励起子ポラリトンに基づく2光子散乱スペクトルの解析 ”, 日本物理学会 2003 年春季 第58回年次大会 (東北大学).

- 5) 三船洋嗣、石原一, “らせん型励起子の光学応答”, 日本物理学会 2003 年秋季大会(岡山大学).
- 6) 大畠悟郎、宮島顕祐、籠谷勇児、芦田昌明、枝松圭一、伊藤正, “CuCl 量子ドットにおける励起子分子の二光子共鳴励起現象” 日本物理学会 2003 年秋季大会 岡山大学 平成 15 年 9 月 21 日.
- 7) 籠谷勇児、大畠悟郎、宮島顕祐、芦田昌明、枝松圭一、伊藤正, “CuCl 量子ドットにおける励起子分子状態からのレーザー発振” 日本物理学会 2003 年秋季大会 岡山大学 平成 15 年 9 月 21 日.
- 8) 宮島顕祐、大畠悟郎、籠谷勇児、芦田昌明、枝松圭一、伊藤正, “CuCl 量子ドットにおける励起子分子の二光子共鳴励起現象 ” 日本物理学会 第 59 回年次大会 九州大学箱崎キャンパス 平成 15 年 3 月 28 日.
- 9) 枝松圭一, 清水亮介, パラメトリック光子対の二光子干渉における位相測定, 日本物理学会第 58 回年次大会, 仙台, 2003 年 3 月 29 日.

2004 年

- 10) 安食博志, “量子論的に扱った共振器-二準位系の非線形感受率--半古典論との比較--” 日本物理学会 2004 年春季 第 59 回年次大会(九州大学)平成15年3月27日.
- 11) 安食博志, “共振器-二準位系における3次非線形応答の最適化条件” 日本物理学会 2004 年秋季大会(青森大学)平成15年9月13日.
- 12) 飯田琢也、石原一, “電子的共鳴光を照射された半導体ナノ物質間に生じる力学的相互作用” 日本物理学会 2004 年春季第 59 回年次大会 (九州大学).
- 13) 飯田琢也、石原一, “電子的共鳴光を照射された半導体ナノ物質間に生じる力学的相互作用” 2004 年 春季 第 51 回応用物理学関係連合講演会、(於,東京工科大学 2004/3/27 ~ 3/30).
- 14) 飯田琢也、石原一, “量子ドットによるポラリトニック分子の結合・反結合状態における光誘起力学的相互作用”, 日本物理学会 2004 年秋季大会, (於,青森大学 2004/9/12 ~ /9/15).
- 15) 越野 和樹, 石原 一, “フォトン間非線形相互作用の半古典論による推定” 日本物理学会 2004 年春季第 59 回年次大会 (九州大学).
- 16) 越野和樹, “偽想定による量子崩壊の促進” 2994 年 9 月 15 日, 日本物理学会 2004 年秋季大会, 青森大学.
- 17) 金野敏和、安食博志、石原一 “励起子活性媒質で均一コートした誘電体微小球の光学応答”、日本物理学会 2004 年秋季大会(青森大学)平成15年9月13日.
- 18) 矢垣真也、石原一, “輻射場のナノ空間構造による閉じ込め励起子系光学応答の制御” 2004 年 春季 第 51 回応用物理学関係連合講演会 (於,東京工科大学 2004/3/27 ~ 3/30).

- 19) 籠谷勇児、宮島顕祐、齋藤伸吾、芦田昌明、伊藤正, “量子ドットでの2光子共鳴励起による励起子分子状態からのレーザー発振 II” 日本物理学会秋の分科会(青森大学、平成 16 年 9 月 12-15 日).
- 20) 枝松 圭一, 半導体を用いた量子もつれ光子対の発生, 第 5 回光物性同学会, 札幌, 2004 年 7 月 17 日.
- 21) 大畠 悟郎, 枝松圭一, 清水亮介, 伊藤正, 半導体を用いた量子もつれ光子対の生成, 日本物理学会第 59 回年次大会, 福岡, 2004 年 3 月 29 日.
- 22) 大畠 悟郎, 清水亮介, 枝松圭一, 伊藤正, 励起子分子から生成される量子もつれ光子対の観測, 日本物理学会 2004 年秋季大会, 青森, 2004 年 9 月 12-15 日.

2005 年

- 23) 安食博志, 石原一, “励起子分子状態を含む 4 準位系の 3 次非線形応答, 共振器 QED による評価” 日本物理学会 2005 年春季 第 60 回年次大会(東京理科大学) 平成 16 年 3 月 27 日.
- 24) 飯田琢也、石原一、”光励起条件下で複数量子ドット間に生じる輻射力の解析的表式”, 日本物理学会第 6 回年次大会、(於,東京理科大 2005/3/24 ~ /3/27).
- 25) 飯田琢也、石原 一, “3 次元任意配置で量子ドット対が受ける共鳴輻射力”, 日本物理学会 2005 年秋季大会, (於,同志社大京田辺キャンパス 2005/9/19 ~ 9/22), 19aXB-6.
- 26) 飯田琢也、石原 一, “量子ドット対と共鳴光の力学的相互作用, 3 次元任意配置における計算”, 第 66 回応用物理学会学術講演会 (於,徳島大学 2005/9/7 ~ 9/11), 7a-ZF-3.
- 27) 越野和樹, 石原一, “Drastic effects of damping mechanisms on the third-order optical nonlinearity”, 2005 年 3 月 27 日, 日本物理学会第 60 回年次大会, 東京理科大学野田キャンパス.
- 28) 越野和樹, “平板共振器における共振器パラメータの計算”, 日本物理学会 2005 年秋季大会, (於,同志社大京田辺キャンパス 2005/9/19 ~ 9/22), 20pWA-11.
- 29) 馬場基彰、石原 一, “全量子的アプローチによる閉じ込め励起子系 Hyper-Raman 散乱の研究”, 日本物理学会 2005 年秋季大会,(於,同志社大京田辺キャンパス 2005/9/19 ~ 9/22), 20aXB-1.
- 30) 保田英樹、石原 一, “励起子閉じ込め複合薄膜における非線形応答の実時間解析”, 日本物理学会 2005 年秋季大会, (於,同志社大京田辺キャンパス 2005/9/19 ~ 9/22), 20pPSA-23.
- 31) 一宮正義、長谷川充、飯田琢也、石原一、芦田昌明、伊藤正, “CuCl ナノ構造における四光波混合信号のサイズ共鳴増大” 日本物理学会第 60 回年次大会(千葉、2005 年 3 月 24 ~ 27 日).
- 32) 一宮正義、澤田 祐志、芦田 昌明、伊藤 正, “電子線励起を用いた ZnO,Zn 蛍光体にお

ける紫外発光効率の増大”, 日本物理学会 2005 年秋季大会 (於,同志社大京田辺キャンパス 2005/9/19 ~ 9/22), 21aXF - 6.

- 33) 南口 勝、長尾 太介、鈴木 貞一、芦田 昌明、伊藤 正, “周期多層膜 1 次元フォトニック結晶における擬似位相整合第二高調波の増強”, 第 66 回応用物理学会学術講演会 (於, 徳島大学 2005/9/7 ~ 9/11), 9p-H-20.
- 34) 宮島顕祐、笹谷勇児、齋藤伸吾、芦田昌明、伊藤正, “量子ドットでの 2 光子共鳴励起による励起子分子状態からのレーザー発振 III” 日本物理学会第 60 回年次大会 (千葉、2005 年 3 月 24 ~ 27 日).
- 35) 秋山、金本、西村、富田、野村、井須, “AlGaAs/AlAs 薄膜周期構造を用いた二光子仮想励起共鳴光ゲートスイッチング”, 第 52 回 応用物理学関係連合講演会、1a-ZQ-4、p.1349 (2005).
- 36) 井上 潤, 井須 俊郎, 赤羽 浩一, 山本 直克, 土屋 昌弘, “高密度 InAs 量子ドットの可飽和吸収特性評価”, 第 66 回応用物理学会学術講演会 (於, 徳島大学 2005/9/7 ~ 9/11), 8a-T-22.
- 37) 井上 潤, 井須 俊郎, 赤羽 浩一, 山本 直克, 土屋 昌弘, “高密度 InAs 量子ドットの 3 次非線形性を用いた光機能素子への検討”, 第 66 回応用物理学会学術講演会 (於, 徳島大学 2005/9/7 ~ 9/11), 8a-T-23.
- 38) 小島 磨、井須 俊郎、早瀬 潤子、土屋 昌弘, “GaAs 薄膜弱閉じ込め励起子の超高速非線形光学応答”, 日本物理学会 2005 年秋季大会 (於,同志社大京田辺キャンパス 2005/9/19 ~ 9/22), 19aYD-6.
- 39) 井上 潤, 井須 俊郎, 赤羽 浩一, 山本 直克, 土屋 昌弘, “高密度 InAs 量子ドットを用いる面型モードロツカの検討”, 電子通信情報学会 2005 年ソサイエティ大会 (於,札幌、2005 年 9 月 20 - 23 日), C-4-34.
- 40) 井上 潤、井須 俊郎、赤羽 浩一、山本 直克、土屋 昌弘, “1.5 μm 高密度 InAs 量子ドットを利用する面型可飽和吸収体の検討”, 電子通信情報学会光エレクトロニクス研究会 (於, 東京、2005 年 10 月 12 日), IEICE Technical Report, OPE2005-68, OME2005-66(2005-10).
- 41) 大畠悟郎、清水亮介、枝松圭一, “半導体を用いた量子もつれ光子対の生成 II - ベルの不等式の破れ - ”, 日本物理学会 2005 年秋季大会, 京田辺, 2005 年 9 月 21 日.
- 42) 田中隆介、三森康義、南不二雄、小坂英男、枝松圭一, “GaAs 量子アイランド中の励起子の時間分解フォトンエコー”, 日本物理学会 2005 年秋季大会, 京田辺, 2005 年 9 月 20 日.

2006 年

- 43) 安食 博志、石原 一, “共振器によるもつれ合い光子対生成の増強効果とスペクトル”, 日本物理学会 2006 年年次大会 (於,愛媛大学 2006/3/22 ~ 3/26), 27pRE-5.
- 44) 安食博志、石原一, “共振器中の量子ドットによるもつれあい光子対生成の理論”, 日本物理学会 2006 年秋季大会(9 月、千葉大学).

- 45) 安食博志, 石原一, “励起子分子-共振器 QED によるもつれあい光子対生成の理論”, 第 15 回量子情報技術研究会 (QIT15), 京都, 2006 年 11 月 21 日 ~ 22 日.
- 46) 飯田 琢也, 石原 一, “量子ナノ光クロマトグラフィの理論”, 日本物理学会 2006 年年次大会 (於, 愛媛大学 2006/3/22 ~ 3/26), 27aWA-4.
- 47) 飯田琢也, 石原一 “量子ナノ光クロマトグラフィーによるナノ材料選別操作の理論” 第 67 回応用物理学会学術講演会(8-9 月、立命館大学).
- 48) 飯田琢也, 石原一 “複合外場の存在下でナノ物質が受ける異常共鳴輻射力” 日本物理学会 2006 年秋季大会(9 月、千葉大学).
- 49) 石川陽, 石原一 “Cavity QED における誘導吸収型 2 光子非線形の理論” 日本物理学会 2006 年秋季大会(9 月、千葉大学) .
- 50) 岡寿樹, 石原一 “散乱および束縛 2 励起子状態が共存するモデルによる量子もつれ合い光子対生成の理論”, 日本物理学会 2006 年秋季大会(9 月、千葉大学).
- 51) 越野和樹, 石原一, 篠塚雄三 “有限サイズ系の 3 次非線形光学応答理論 量子開放系としての視点から”, 日本物理学会 2006 年秋季大会(9 月、千葉大学).
- 52) 越野和樹, “Semiclassical Evaluation of Two-Photon Cross-Kerr Effect”, 第 15 回量子情報技術研究会 (QIT15), 京都, 2006 年 11 月 21 日 ~ 22 日.
- 53) 馬場基彰, 石原一 “電磁場の量子性を導入した微視的非局所理論” 日本物理学会 2006 年秋季大会(9 月、千葉大学).
- 54) 保田 英樹, 一宮 正義, 芦田 昌明, 伊藤 正, 石原 一, “薄膜における超高速縮退四光波混合の理論解析”, 日本物理学会 2006 年年次大会 (於, 愛媛大学 2006/3/22 ~ 3/26), 28pRE-4.
- 55) 一宮 正義, 芦田 昌明, 保田 英樹, 石原 一, 伊藤 正, “CuCl 薄膜における超高速縮退四光波混合”, 日本物理学会 2006 年年次大会 (於, 愛媛大学 2006/3/22 ~ 3/26) , 28pRE - 3.
- 56) 一宮正義, 小林有太, 澤田祐志, 芦田昌明, 伊藤正 “CuCl における励起子発光の電子線照射効果” 日本物理学会 2006 年秋季大会 千葉大学 (千葉市) 2006 年 9 月 26 日.
- 57) 稲葉 和弘, 今和 泉啓, 片山 浩一, 一宮 正義, 芦田 昌明, 飯田 琢也, 石原 一, 伊藤 正, “超流動ヘリウム中における CuCl ナノ微粒子の作製及び光マニピュレーション”, 日本物理学会 2006 年年次大会 (於, 愛媛大学 2006/3/22 ~ 3/26) , 27aWA - 5.
- 58) 稲葉和宏, 今和泉啓, 片山浩一, 一宮正義, 芦田昌明, 飯田琢也, 石原一, 伊藤正, “超流動ヘリウム中における量子ドットの作製および光マニピュレーション” 第 67 回応用物理学会学術講演会 立命館大学 びわこ・くさつキャンパス (滋賀県草津市) 2006 年 8 月 29 日.
- 59) 澤田 浩明, 宮島 顕祐, 芦田 昌明, 伊藤 正, “CuCl 量子ドット中の励起子分子による赤

外誘起吸収スペクトル ”, 日本物理学会 2006 年年次大会 (於,愛媛大学 2006/3/22 ~ 3/26), 27aWA - 6.

- 60) 宮島顕祐、籠谷勇児、櫻井康平、齋藤伸吾、芦田昌明、伊藤正, “CuCl 量子ドットにおける励起子分子二光子共鳴励起下での超高速発光現象” 日本物理学会 2006 年秋季大会 千葉大学 (千葉市) 2006 年 9 月 24 日.
- 61) 小島 磨、井須 俊郎、早瀬(伊師)潤子、佐々木 雅英、土屋 昌弘, “GaAs 薄膜弱閉じ込め励起子の非線形過渡応答”, 日本物理学会 2006 年年次大会 (於,愛媛大学 2006/3/22 ~ 3/26), 28 p RE-7.
- 62) 小島 磨、井須俊郎、早瀬(伊師)潤子、佐々木雅英、土屋昌弘, “GaAs 薄膜中の弱閉じ込め励起子による超高速非線形光学応答”, 第 67 回応用物理学会学術講演会(立命館大学, 2006.8.29-9.1).
- 63) 小島 磨、井須俊郎、早瀬(伊師)潤子、佐々木雅英、土屋昌弘, “GaAs 薄膜における弱閉じ込め励起子の量子ビート”, 日本物理学会 2006 年秋季大会 (千葉大学, 2006.9.23-26).
- 64) 松田信幸、清水亮介、三森康義、小坂英男、枝松圭一, “偏光サニャック干渉計を用いたフォトリック結晶ファイバの非線形位相シフト測定”, 日本物理学会第 61 回年次大会, 松山, 2006 年 3 月 27 日.
- 65) 清水亮介、山口貴司、三森康義、小坂英男、枝松圭一, “パラメトリック下方変換における空間相関効果を利用した量子もつれ光子対の生成”, 日本物理学会第 61 回年次大会, 松山, 2006 年 3 月 30 日.
- 66) 久津輪武史、新井宏一郎、執行英樹、金城英人、大野圭司、三森康義、小坂英男、枝松圭一, “光子スピン量子状態転写のための GaAs 系量子トランスポート素子の単一光子応答”, 日本物理学会第 61 回年次大会, 松山, 2006 年 3 月 27 日.
- 67) 新井宏一郎、久津輪武史、金城英人、大野圭司、三森康義、小坂英男、枝松圭一, “光子スピン量子状態転写のための量子トランスポート測定による GaAs 系量子構造の g 因子測定”, 日本物理学会第 61 回年次大会, 松山, 2006 年 3 月 27 日.
- 68) 執行英樹、米澤元、久津輪武史、新井宏一郎、三森康義、小坂英男、枝松圭一, “光子スピン量子状態転写のための量子光学測定による GaAs 系量子構造の g 因子測定”, 日本物理学会第 61 回年次大会, 松山, 2006 年 3 月 27 日.
- 69) 枝松圭一, “半導体を用いた量子情報通信 - 最近の進展と課題 - ”, 第 6 回光物性同学会, 仙台, 2006 年 4 月 29 日.
- 70) 長能重博、杉山 卓、水津光司、清水亮介、枝松圭一、伊藤弘昌, “擬似位相整合 LiNbO₃ を用いたタイプ II パラメトリック下方変換デバイスの作製と評価”, 第 67 回応用物理学会学術講演会, 草津, 2006 年 8 月 30 日.
- 71) 小坂英男、上野若菜、執行英樹、久津輪武史、新井宏一郎、三森康義、枝松圭一、今村裕志、力武克彰、高河原俊秀, “光子スピン量子状態転写のための g 因子制御量子構造における負の偏極”, 日本物理学会 2006 年秋季大会, 千葉, 2006 年 9 月 23 日.

- 72) 松田信幸, 清水亮介, 三森康義, 小坂英男, 枝松圭一, “偏光サニャック干渉計を用いた光誘起微小位相シフトの測定”, 日本物理学会 2006 年秋季大会, 千葉, 2006 年 9 月 25 日.
- 73) 金城英人, 新井宏一郎, 久津輪武史, 大野圭司, 小坂英男, 枝松圭一, “光子スピン量子状態転写のための量子トランスポート測定による GaAs 系量子構造の g 因子推定 II”, 日本物理学会 2006 年秋季大会, 千葉, 2006 年 9 月 25 日.
- 74) 久津輪武史, 新井宏一郎, 金城英人, 大野圭司, 三森康義, 小坂英男, 枝松圭一, “光子スピン量子状態転写のための単一量子ドットによる単一光子応答”, 日本物理学会 2006 年秋季大会, 千葉, 2006 年 9 月 25 日.
- 75) 山口貴司, 清水亮介, 三森康義, 小坂英男, 枝松圭一, “パラメトリック下方変換における空間相関効果を利用した量子もつれ光子対の生成 II”, 日本物理学会 2006 年秋季大会, 千葉, 2006 年 9 月 26 日.

2007 年

- 76) 安食博志, 石原一, “共振器-量子ドット系から生成されるもつれあい光子対の性質” 日本物理学会 2007 年春季大会 (於, 鹿児島大学 郡元キャンパス 2007/3/18~3/21).
- 77) 安食博志, 石原一, “共振器-3準位系のハイパーパラメトリック散乱によるもつれあい光子対生成”, 日本物理学会第62回年次大会 北海道, 2007年9月24日.
- 78) 石原一, “光電場のナノ空間構造による新機能デバイスの創製” ナノテクデバイス研究会, つくば, 2007 年 7 月 9 日-10 日.
- 79) 飯田琢也, “ナノ系の量子効果を利用した光マニピュレーションの理論” CREST “光電場のナノ空間構造による新機能デバイスの創製” シンポジウム(兵庫県立淡路夢舞台国際会議場, 2007.3.1-3).
- 80) 飯田琢也, 石原一, “共鳴輻射力顕微分光の理論”, 日本物理学会 2007 年春季大会 (於, 鹿児島大学郡元キャンパス 2007/3/18~3/21).
- 81) 飯田琢也, 石原一, “電子的共鳴条件下における粒子間輻射力を利用した顕微分光の理論” 第 54 回応用物理学関係連合講演会 (於, 青山学院大学 相模原キャンパス 2007/3/27~3/30).
- 82) 飯田琢也, 石原一, “光誘起力による量子ドット配列構造中集団励起状態の観測可能性” 22pTR-7, 日本物理学会 2007 年第 62 回年次大会 (於, 北海道大学札幌キャンパス 2007/9/21~9/24).
- 83) 石川陽, “共振器-多自由度系における 2 光子非線形性の理論” CREST “光電場のナノ空間構造による新機能デバイスの創製” シンポジウム(兵庫県立淡路夢舞台国際会議場, 2007.3.1-3).
- 84) 石川陽, 石原一, “複数量子ドット励起子分子系からの超放射の理論” 日本物理学会第 62 回年次大会 北海道大学札幌キャンパス 21-24 09 2007.

- 85) 岡 寿樹(阪府大院工), 石原一(阪府大院工, CREST-JST), “共振器 bipolariton による高効率量子もつれ光子対生成の理論” 日本物理学会第 62 回年次大会 北海道大学札幌キャンパス 21-24 09 2007.
- 86) 越野和樹, “2 光子間クロスカー効果の半古典評価法” 日本物理学会 2007 年春季大会 鹿児島大学 (鹿児島市) 2007 年 3 月 21 日.
- 87) 越野和樹, “光子数確定パルスの空間制御理論” さきがけ領域会議, 福岡シーホークホテル, 4/14.
- 88) 越野和樹, “Novel Method for Solving the Quantum Nonlinear Dynamics of Photons, Use of a Classical Input”, 東北大学理学部物理学科 物性コロキウム, 東北大学, 8/31.
- 89) 越野和樹, “Novel Method for Solving the Quantum Nonlinear Dynamics of Photons, Use of a Classical Input”, 日本物理学会, 北大, 9/24.
- 90) 越野和樹, “Single-photon filtering by a photon blockade system” 第 17 回量子情報技術研究会, 山陽新聞本社さん太ホール, 2008 年 11 月 21 日-22 日.
- 91) 馬場基彰, “弱閉じ込め励起子に対する QED 理論とその応用” CREST “光電場のナノ空間構造による新機能デバイスの創製” シンポジウム(兵庫県立淡路夢舞台国際会議場, 2007.3.1-3).
- 92) 馬場基彰, 石原一, “電磁場との相互作用の自己無撞着性を考慮した励起子の位相緩和理論”, 日本物理学会 2007 年春季大会 (於, 鹿児島大学 郡元キャンパス 2007/3/18 ~ 3/21).
- 93) 保田英樹, “光と物質波動のインタープレイを活用した超高速光学応答の実現” CREST “光電場のナノ空間構造による新機能デバイスの創製” シンポジウム(兵庫県立淡路夢舞台国際会議場, 2007.3.1-3).
- 94) 保田英樹, 一宮正義, 芦田昌明, 伊藤正, 石原一, “CuCl 薄膜における超高速励起子輻射緩和, 実時間非局所理論による解析”, 日本物理学会 2007 年春季大会 (於, 鹿児島大学 郡元キャンパス 2007/3/18 ~ 3/21).
- 95) 吉水聖, 飯田琢也, 石原一, “ナノ微粒子にラゲールガウスビームが及ぼす共鳴輻射力の理論” 日本物理学会 2007 年春季大会 (於, 鹿児島大学 郡元キャンパス 2007/3/18 ~ 3/21).
- 96) 伊藤正, “ナノ構造における超高速光学機能 新機能探索グループのねらいと総括” CREST “光電場のナノ空間構造による新機能デバイスの創製” シンポジウム(兵庫県立淡路夢舞台国際会議場, 2007.3.1-3).
- 97) 伊藤正, “I-VII 系薄膜, 量子ドットを用いた新材料・新現象の探索” ナノテクデバイス研究会, つくば, 2007 年 7 月 9 日-10 日.
- 98) 一宮正義, “ナノ構造と光の長距離結合効果による励起子の超高速緩和” CREST “光電場のナノ空間構造による新機能デバイスの創製” シンポジウム(兵庫県立淡路夢

舞台国際会議場,2007.3.1-3).

- 99) 一宮正義、芦田昌明、保田英樹、石原一、伊藤正, "CuCl 薄膜における超高速励起子輻射緩和,過渡的回折格子分光法による観測" 日本物理学会 2007 年春季大会 (於,鹿児島大学 郡元キャンパス 2007/3/18~3/21).
- 100) 稲葉和宏, " 超流動ヘリウム中におけるナノ微粒子作製および光マニピュレーション " CREST " 光電場のナノ空間構造による新機能デバイスの創製 " シンポジウム(兵庫県立淡路夢舞台国際会議場,2007.3.1-3).
- 101) 稲葉和宏,一宮正義,芦田昌明,飯田琢也,石原一,伊藤正, "超流動ヘリウム中でのレーザーアブレーションによる CuCl ナノ微粒子の作製および光マニピュレーション", 日本物理学会第 62 回年次大会 北海道大学札幌キャンパス (札幌) 2007 年 9 月 21 日.
- 102) 澤田祐志、一宮正義、芦田昌明、尾崎信二、下村哲、伊藤正, "GaAs/AlGaAs 単層ピラミッド型キャップ構造におけるナノスケール低温カスケードルミネッセンス特性" ナノ学会第 5 回大会 つくば国際会議場(つくば) 2007 年 5 月 21 日.
- 103) 井須俊郎, 小島 磨, 早瀬 (伊師) 潤子, 菅野敦史, Redouane Katouf, 土屋昌弘, " 超高速光スイッチに向けた GaAs 系弱閉じ込め励起子の光学応答 ", CREST " 光電場のナノ空間構造による新機能デバイスの創製 " シンポジウム(兵庫県立淡路夢舞台国際会議場,2007.3.1-3) p.23.
- 104) 小島磨, 井須俊郎, 早瀬(伊師)潤子, 菅野敦史, Redouane Katouf, 佐々木雅英, 土屋昌弘, " 励起レーザースペクトル制御による弱閉じ込め励起子の非線形光学応答 ", CREST " 光電場のナノ空間構造による新機能デバイスの創製 " シンポジウム(兵庫県立淡路夢舞台国際会議場,2007.3.1-3) p.25.
- 105) 菅野敦史, Redouane Katouf, 小島 磨, 早瀬 (伊師) 潤子, 佐々木雅英, 土屋昌弘, 井須俊郎, " GaAs 弱閉じ込め励起子の時間分解フォトルミネッセンス ", CREST " 光電場のナノ空間構造による新機能デバイスの創製 " シンポジウム(兵庫県立淡路夢舞台国際会議場,2007.3.1-3) p.27.
- 106) 小島磨, 井須俊郎, 早瀬 (伊師) 潤子, 菅野敦史, 佐々木雅英, 土屋昌弘, " 弱閉じ込め励起子非線形光学応答の複数準位励起効果 ", 第 54 回応用物理学関係連合講演会 (青山学院大学, 2007.3.27-30) .
- 107) 菅野敦史, 井須俊郎, 小島磨, 早瀬 (伊師) 潤子, 佐々木雅英, 土屋昌弘, " GaAs 薄膜中弱閉じ込め励起子の光学応答 ", 第 54 回応用物理学関係連合講演会 (青山学院大学, 2007.3.27-30) .
- 108) 井須俊郎, " 光電場のナノ空間構造を利用した超高速光スイッチの開発 ", ナノテクデバイス研究会, つくば, 2007.7.9-10.
- 109) 小島磨, 井須俊郎, 早瀬 (伊師) 潤子, 菅野敦史, Redouane Katouf, 佐々木雅英, 土屋昌弘, " 弱閉じ込め励起子系の非線形光学応答に対する残留キャリア効果 ", 第 68 回応用物理学学会学術講演会, (北海道工業大学 札幌, 2007.9.4-8).
- 110) 菅野敦史, Katouf Redouane, 小島磨, 早瀬 (伊師) 潤子, 土屋昌弘, 井須俊郎, " 弱

閉じ込め励起子系における光カー効果のピコ秒応答”，第 68 回応用物理学学会学術講演会，(北海道工業大学 札幌，2007.9.4-8).

- 111) 枝松圭一，量子位相ゲートの実現に向けた量子もつれ光子対光源および微小非線形位相シフト測定技術の開発，CREST”光電場のナノ空間構造による新機能デバイスの創製”シンポジウム，淡路，2007 年 3 月 1-3 日.
- 112) 清水亮介，山口貴司，杉浦洋平，三森康義，小坂英男，枝松圭一，長能重博，水津光司，伊藤弘昌，パラメトリック下方変換による新しい偏 光量子もつれ光子対光源の開発，CREST”光電場のナノ空間構造による新機能デバイスの創製”シンポジウム，淡路，2007 年 3 月 1-3 日
- 113) 松田信幸，清水亮介，三森康義，小坂英男，枝松圭一，フォトニック結晶ファイバにおける少数光子誘起相互位相変調の測定，CREST”光電場のナノ空間構造による新機能デバイスの創製”シンポジウム，淡路，2007 年 3 月 1-3 日
- 114) 小坂英男，執行英樹，久津輪武史，三森康義，枝松圭一，今村裕志，力武克彰，高河原俊秀，“光子から電子スピンへの量子状態転写 ポピュレーション転写からコヒーレンス転写へ”，日本物理学会 2007 年春季大会，鹿児島，2007 年 3 月 18-21 日
- 115) 久津輪武史，新井宏一郎，大野圭司，Oleg Astafiev，小宮山進，三森康義，小坂英男，枝松圭一，“単一量子ドットによる単一光子から単一電子への変換と非破壊検出”，日本物理学会 2007 年春季大会，鹿児島，2007 年 3 月 18-21 日
- 116) 杉浦洋平，清水亮介，枝松圭一，長能重博，杉山卓，水津光司，伊藤弘昌，“PPLN を用いた準同軸 Type-II 位相整合による量子もつれ光子対の生成”，日本物理学会 2007 年春季大会，鹿児島，2007 年 3 月 18-21 日
- 117) J. Zhang, R. Shimizu, Y. Mitsumori, H. Kosaka, and K. Edamatsu, “Ultra-fast measurement of optical field statistics and reconstruction of quantum state”, 日本物理学会 2007 年春季大会，鹿児島，2007 年 3 月 18-21 日
- 118) 長能重博，水津光司，杉浦洋平，清水亮介，枝松圭一，伊藤弘昌，“擬位相整合 LiNbO_3 を用いたタイプ II パラメトリック下方変換デバイスの作製と評価(2)”，第 54 回応用物理学関係連合講演会，相模原，2007 年 3 月 27-30 日
- 119) 枝松圭一，“量子位相ゲートの実現に向けた量子もつれ光子対光源および微小非線形位相シフト測定技術の開発” ナノテクデバイス研究会、つくば、2007 年 7 月 9 日-10 日
- 120) 長能 重博，清水 亮介，東海林篤，松田信幸，水津 光司，枝松 圭一，“組成の異なる LiNbO_3 および LiTaO_3 単結晶の Brillouin 温度依存性”，第 68 回応用物理学学会学術講演会，札幌，2007 年 9 月 4-8 日
- 121) 桑原真人，久津輪武史，今野貴支，大野圭司，三森康義，小坂英男，枝松圭一，“光子スピン量子状態転写のための g 因子制御量子ドット構造における光応答特性”，日本物理学会第 62 回年次大会，札幌，2007 年 9 月 21-24 日
- 122) 久津輪武史，桑原真人，今野貴支，大野圭司，三森康義，小坂英男，枝松圭一，“光子スピン量子状態転写のための g 因子制御量子ドット構造における量子輸送特性”，日本物

理学会第 62 回年次大会, 札幌, 2007 年 9 月 21-24 日

- 123) 小坂英男, 執行英樹, 久津輪武史, 三森康義, 枝松圭一, 今村裕志, 力武克彰, 高河原俊秀, “光子から電子スピンへの量子状態転写 ポピュレーション転写からコヒーレンス転写へ 2 ”, 日本物理学会第 62 回年次大会, 札幌, 2007 年 9 月 21-24 日
- 124) 三森康義, 小坂英男, 枝松圭一, 赤羽浩一, 山本直克, 佐々木雅英, 大谷直毅, “InAs 系自己形成量子ドットの励起子四光波混合のドット密度依存性”, 日本物理学会第 62 回年次大会, 札幌, 2007 年 9 月 21-24 日
- 125) 松田信幸, 清水亮介, 三森康義, 小坂英男, 枝松圭一, “フォトリック結晶ファイバにおける少数光子誘起非線形位相シフトの測定”, 日本物理学会第 62 回年次大会, 札幌, 2007 年 9 月 21-24 日
- 126) 山口貴司, 清水亮介, 長能重博, 水津光司, 三森康義, 小坂英男, 枝松圭一, “パラメトリック下方変換における空間相関効果を利用した量子もつれ光子対の生成 III”, 日本物理学会第 62 回年次大会, 札幌, 2007 年 9 月 21-24 日
- 127) 清水亮介, 杉浦洋平, 長能重博, 水津光司, 枝松圭一, “PPLN を用いた準同軸 type-II 位相整合による量子もつれ光子対の生成 II”, 日本物理学会第 62 回年次大会, 札幌, 2007 年 9 月 21-24 日
- 128) 東海林篤, 長能重博, 清水亮介, 水津光司, 枝松圭一, “周期分極反転 LiNbO₃ を用いたパラメトリック下方変換による 1550 nm 帯光子対の生成”, 日本物理学会第 62 回年次大会, 札幌, 2007 年 9 月 21-24 日

ポスター発表 (国内会議 149 件, 国際会議 79 件)

1. 国際会議

2003 年

- 1) H. Ajiki, Wang Yao, Lu Sham, “Kerr effect of a quantum dot in a cavity”, CREST & QNN 03 Joint International Workshop, (in Yumebutai Awaji, Japan, 2003/7/21 ~ 7/23).
- 2) T. Iida and H. Ishihara, “A novel approach for handling nano objects by radiation force under the quantum mechanical resonance conditions”, CREST & QNN 03 Joint International Workshop, (in Yumebutai Awaji, Japan, 2003/7/21 ~ 7/23).
- 3) T. Iida and H. Ishihara, “A new type of optical manipulation of nanoscale objects”, Quantum Electronics and Laser Science, (QELS 2003) (in Baltimore Maryland USA, 2003/6/01 ~ 6/06).
- 4) H. Ishihara and T. Namatani, “Influence of exciton-exciton interaction on the system-size dependence of $\chi^{(3)}$ at one-exciton resonance”, Quantum Electronics and Laser Science, (QELS 2003) (in Baltimore Maryland USA, 2003/6/01 ~ 6/06).

- 5) K. Koshino, "Theoretical study on optical response of one-dimensional photonic crystal slabs", CREST & QNN 03 Joint International Workshop, (in Yumebutai Awaji, Japan, 2003/7/21 ~ 7/23).
- 6) H. Mifune and H. Ishihara, "Optical Response of Spiral-type Excitons", CREST & QNN 03 Joint International Workshop, (in Yumebutai Awaji, Japan, 2003/7/21 ~ 7/23).
- 7) S. Yagaki and H. Ishihara, "Control of the radiative decay rate of nondipole-type states with the spatial structure of the radiation field", CREST & QNN 03 Joint International Workshop, (in Yumebutai Awaji, Japan, 2003/7/21 ~ 7/23).
- 8) K. Miyajima, K. Edamatsu and T. Itoh, "Infrared transient absorption and excited-states of excitons and biexcitons confined in CuCl quantum dots", International Conference on Dynamical Processes in Excited States of Solids (DPC 2003) Christchurch, New Zealand, August 5.
- 9) K. Akiyama, N. Tomita, T. Nishimura, Y. Nomura, T. Isu; "Accurate detection of amplitude and phase changes using polarized heterodyne pump-probe technique", CREST & QNN 03 Joint International Workshop, (in Yumebutai Awaji, Japan, 2003/7/21 ~ 7/23) MP-31.
- 10) R. Shimizu, K. Edamatsu, and T. Itoh, "Diffraction and interference of spatially correlated photon pairs", CREST and QNN'03 Joint International Workshop, Awaji, Japan, July 21-23, 2003

2004年

- 11) H. Ajiki, "Nonlinear susceptibility for a two-level system in cavity QED", The 6th International Conference on Excitonic Processes in Condensed Matter (EXCON 2004), (in Jagiellonian University, Cracow Poland, 2004/7/06 ~ /7/09).
- 12) T. Iida and H. Ishihara, "Optically-induced mechanical interaction between semiconductor quantum dots under an electronic resonance condition", 3rd International Conference on Semiconductor Quantum Dots (QD 2004), (in the Banff centre, Banff Canada, 2004/5/10 ~ /5/13).
- 13) T. Iida and H. Ishihara, "Resonant light induced mechanical interaction between a pair of quantum dots", Workshop on Chaos and Nonlinear Dynamics in Quantum Mechanical and Macroscopic Systems, (in Yukawa Institute for Theoretical Physics, Kyoto University, Japan, 2004/12/08 ~ /12/10).
- 14) T. Iida and H. Ishihara, "Polaritonic molecule formation by radiation force between quantum dots", International Workshop on Materials Science and Nano-Engineering, (in Icho Kaikan, Osaka University, Japan, 2004/12/11 ~ /12/14).
- 15) H. Ishihara, S. Yagaki, "Drastic control of the radiative lifetime of

nondipole-type excitons by manipulating the spatial structure of the radiation field”, International Quantum Electronics Conference (San Francisco, 2004).

- 16) H. Ishihara and H. Mifune, “ Linear and nonlinear optical response of spiral-type excitons ”, (EXCON 2004), (in Jagiellonian University, Cracow Poland, 2004/7/06 ~ /7/09).
- 17) K. Koshino and H. Ishihara, “ Two-photon nonlinearity in general cavity QED systems ”, Nonlinear Optics Topical Meeting, (Hawaii Island, 2004).
- 18) K. Koshino and H. Ishihara, “ Two-photon nonlinearity in general cavity QED systems ”, International Workshop on Materials Science and Nano-Engineering, (in Icho Kaikan, Osaka University, Japan, 2004/12/11-12/14).
- 19) K. Koshino, “ Quantum Zeno and anti-Zeno effects by imperfect measurements ”, International Workshop on Materials Science and Nano-Engineering (in Icho Kaikan, Osaka University, Japan, 2004/12/11-/12/14).
- 20) M. Ichimiya, M. Hasegawa, T. Iida, H. Ishihara, M. Ashida and T. Itoh, “ Enhancement of Degenerate Four-Wave Mixing Signal in CuCl Nanostructures ”, International Workshop on Materials Science and Nano-Engineering (11-14 December 2004, Osaka, Japan)
- 21) S. Kagotani, S. Saito, M. Ashida, K. Edamatsu, T. Itoh, “ Two-Photon Excitation of Confined Biexcitons in CuCl Quantum Dots” K. Miyajima, G. Oohata, Y. Quantum Dots 2004 (Banff, Canada, May 10-13, 2004)
- 22) M. Takata, M. Hasegawa, T. Iida, H. Ishihara, M. Ashida and T. Itoh, “ Growth of CuCl thin films by electron-beam assisted MBE and their optical properties ”, International Symposium on the Creation of Novel Nanomaterials Osaka, Jan. 21.
- 23) T. Horii, T. Hirai, M. Minamiguchi, N. Ohno, M. Ashida and T. Itoh, “ Cathodoluminescence of ZnO,Zn phosphor powders ”, International Symposium on the Creation of Novel Nanomaterials, Osaka, Jan. 21.
- 24) T. Horii, T. Hirai, Y. Sawada, M. Minamiguchi, M. Ichimiya, N. Ohno, M. Ashida and T. Itoh, “ Ultraviolet and green luminescence of ZnO microcrystals under electron beam and laser excitation ” 6th International Conference on Excitonic Processes in Condensed Matter (6-9 July 2004, Cracow, Poland)
- 25) M. Minamiguchi, M. Ashida and T. Itoh, “ Enhancement of second harmonic generation using photonic band structure by optimizing density of mode for quasi-phase-matching wavelength ” Seventh International Symposium on Contemporary Photonics Technology (CPT 2004) Tokyo, Jan. 15.
- 26) K. Edamatsu, G. Oohata, R. Shimizu, and T. Itoh, “ Entangled-photon generation using hyper-parametric scattering in a semiconductor ”, International Symposium on Quantum Info-Communications and Related Quantum Nanodevices, Tokyo, Japan, March 11-12, 2004

- 27) R. Shimizu and K. Edamatsu, "Quantum diffraction and interference of entangled photon pairs", International Symposium on Quantum Info-Communications and Related Quantum Nanodevices, Tokyo, Japan, March 11-12, 2004

2005 年

- 28) H. Ajiki, H. Ishihara, "Optimal Condition for Large Optical Nonlinearity of Cavity Systems", *European Quantum Electronics Conference (EQEC2005)* (June 12-17, 2005, Munich ICM International Congress Centre, Munich Germany)
- 29) K. Koshino, H. Ishihara, "Nonlinear interaction between two photons mediated by nonlinear media embedded in a cavity", *European Quantum Electronics Conference (EQEC2005)* (June 12-17, 2005, Munich ICM International Congress Centre, Munich Germany)
- 30) M. Ichimiya, M. Hasegawa, H. Ishihara, M. Ashida and T. Itoh, "Enhancement of Degenerate Four-Wave Mixing Signal in CuCl Nanostructures with High Crystalline Quality", International Quantum Electronics Conference 2005 and the Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics 2005, July 11-15, 2005, Tokyo, Japan, JWAB3-P1.
- 31) M. Ichimiya, Y. Sawada, M. Ashida and T. Itoh, "Free Exciton Luminescence of ZnO,Zn Microcrystals under Electron Beam Excitation", 12th International Conference on II-VI Compounds, September 12-16, 2005, Warsaw, Poland, Tue-P-66.
- 32) T. Isu, K. Akiyama, N. Tomita, T. Nishimura, Y. Nomura and K. Kanamoto, "Optical Kerr gate switching of AlGaAs/AlAs multilayer structures without pattern effects by the two-photon resonant nonlinear response", 32nd International Symposium on Compound Semiconductors, Sep. 18-22 2005, Rust Germany, WeP09.
- 33) O. Kojima, T. Isu, J. Ishi-Hayase, and M. Tsuchiya, "Spectrally resolved nonlinear optical response of weakly confined excitons under femtosecond laser pulse excitation in GaAs thin films", 32nd International Symposium on Compound Semiconductors, Sep. 18-22 2005, Rust Germany, WeP27.
- 34) J. Inoue, T. Isu, K. Akahane, N. Yamamoto and M. Tsuchiya, "Characterization of highly stacked InAs quantum dots layers on InP substrate for a planar saturable absorber at 1.5 μm band", 32nd International Symposium on Compound Semiconductors, Sep. 18-22 2005, Rust Germany, WeP29.
- 35) G. Oohata, R. Shimizu, and K. Edamatsu, "Generation of entangled photons in a semiconductor and violation of Bell's inequality", 8th International Symposium on Foundations of Quantum Mechanics in the Light of New Technology, ISQM-Tokyo'05, Hatoyama, Japan, August 22-25, 2005
- 36) G. Oohata, R. Shimizu, and K. Edamatsu, "Entangled photons from a semiconductor", Wilhelm und Else Heraeus-Seminar, The Photon, Generation, Detection, and Application, Bad Honnef, Germany, November 6-9, 2005

2006 年

- 37) H. Ajiki and H. Ishihara, "Cavity Effect on Generation of Entangled Photon Pairs from Biexcitons", Quantum Electronics and Laser Science Conference (Long Beach, 2006)
- 38) T. Iida, H. Ishihara, "Collective Effects in Radiation Force on Movable Quantum Dots", The 4th International Conference on Quantum Dots (QD 2006) (Majestic Conference Centre, Chamonix-Mont Blanc, France, May 1- 5, 2006)
- 39) T. Iida, H. Ishihara, Theoretical Study of the Resonant-Light-Induced Force Microscopy The 9th International Conference on Noncontact Atomic Force Microscopy (International Conference Center Kobe, Kobe, Japan, July 16-20, 2006)
- 40) T. Iida, H. Ishihara, Anomalous Radiation Force on Movable Quantum Dots in Collective Modes of Spatially-separated Polaritons, International Conference on Quantum Mechanics and Chaos (QMC 2006) (Media Center at Sugimoto Campus, Osaka City University, Japan September 19- 21, 2006)
- 41) M. Bamba and H. Ishihara, Entangled-Photon Generation via Biexcitons in Semiconductor Nano-Structures, Quantum Electronics and Laser Science Conference (Long Beach, 2006)
- 42) H. Yasuda and H. Ishihara, Cooperative effect in nonlinear response of nondipole-type excitons confined in multiple nano-layers 7th International Conference on Excitonic Processes in Condensed Matter (EXCON 2006), Wake Forest University (Winston-Salem, NC USA), June 27, 2006.
- 43) M. Ichimiya, Y. Kobayashi, Y. Sawada, M. Ashida and T. Itoh, "Cathodoluminescence of CuCl at Low Temperature", The 16th International Microscopy Congress (IMC16) Sapporo Convention Center (Sapporo, Japan) September 7, 2006
- 44) K. Inaba, K. Imaizumi, K. Katayama, M. Ichimiya, M. Ashida, T. Iida, H. Ishihara and T. Itoh, Optical fabrication and manipulation of semiconductor quantum dots, Handai Nanoscience and Nanotechnology International Symposium (Osaka, 2006) (Nakanoshima Center, Osaka University, Osaka, Japan, November 20- 22, 2006)
- 45) Y. Tokura, M. Ichimiya, Y. Sawada, K. Miyajima, M. Ashida and T. Itoh, "Enhancement of Intrinsic Luminescence in ZnO,Zn Microcrystals under Electron Beam Excitation", The 16th International Microscopy Congress (IMC16), Sapporo Convention Center (Sapporo, Japan) September 8, 2006
- 46) O. Kojima, T. Isu, J. Ishi-Hayase, M. Tsuchiya, "Nonlinear Optical Response of Weakly Confined Excitons in GaAs Thin Films Under Irradiation of Femtosecond Laser Pulses", 9th International Symposium on Contemporary Photonics Technology, Jan.11-13, 2006, Tokyo Japan.
- 47) O. Kojima, T. Isu, J. Ishi-Hayase, M. Sasaki, and M. Tsuchiya, "Selective

generation of quantum beats of weakly confined excitons”, International Conference of Physics of Semiconductors (Viena, 2006.7.24-28) TuA3k.6, p.78.

- 48) O. Kojima, T. Isu, J. Ishi-Hayase, M. Sasaki, and M. Tsuchiya, “Ultrafast nonlinear optical response of weakly confined excitons in GaAs thin films”, 33rd International Symposium on Compound Semiconductors (Vancouver, 2006.8.13-17) 1.30, p.113.
- 49) O. Kojima, T. Isu, J. Ishi-Hayase, M. Sasaki, and M. Tsuchiya, “Nonlinear optical response of weakly confined excitons”, Kobe Frontier Technology Forum (Kobe, 2006.11.8-9), P38.
- 50) H. Shigyou, G. Yonezawa, T. Kutsuwa, K. Arai, Y. Mitsumori, H. Kosaka, and K. Edamatsu, “Quantum optical g-factor measurements in GaAs quantum structure for photon-spin quantum state transfer”, The 1st International Symposium on Bio- and Nano-Electronics in Sendai, Sendai, Japan, March 2-3, 2006
- 51) N. Matsuda, R. Shimizu, Y. Mitsumori, H. Kosaka, and K. Edamatsu, Measurement of nonlinear phase shifts induced by optical Kerr effect using a polarization Sagnac interferometer, The 1st International Symposium on Bio- and Nano-Electronics in Sendai, Sendai, Japan, March 2-3, 2006
- 52) T. Kutsuwa, K. Arai, H. Shigyo, H. Kinjo, K. Ono, Y. Mitsumori, H. Kosaka, and K. Edamatsu, “Single photon response in GaAs quantum transport devices for photon-spin quantum state transfer”, 4th International Conference on Physics and Applications of Spin Related Phenomena in Semiconductors, Sendai, Japan, August 15-18, 2006
- 53) K. Arai, T. Kutsuwa, H. Kinjo, K. Ono, H. Kosaka, and K. Edamatsu, “Evaluation of g-factor by quantum transport measurement for photon-spin quantum state transfer”, 4th International Conference on Physics and Applications of Spin Related Phenomena in Semiconductors, Sendai, Japan, August 15-18, 2006
- 54) R. Shimizu, T. Yamaguchi, Y. Mitsumori, H. Kosaka, and K. Edamatsu, “Generation of polarization entanglement converted from a spatial correlation in spontaneous parametric down-conversion”, European Conference on Optical Communication (ECOC2006), Cannes, France, September 24-28, 2006
- 55) N. Matsuda, R. Shimizu, Y. Mitsumori, H. Kosaka, and K. Edamatsu, “Measurement of nonlinear phase shifts of a photonic crystal fiber using a polarization-division Sagnac interferometer”, European Conference on Optical Communication (ECOC2006), Cannes, France, September 24-28, 2006

2007年

- 56) H. Ajiki and H. Ishihara, Photon Blockade Effect on Entangled Photon Generation from a Quantum Dot in Microcavity, Lasers and Electro-Optics European Quantum Electronics Conf.(EQEC), Munich, Jun. 19, 2007

- 57) H. Ajiki and H. Ishihara, Second-Order Correlation Function of Entangled Photons from a Quantum Dot in Microcavity, 10th Conference on the "Optics of Excitons in Confined Systems", Messina, Sep. 10, 2007
- 58) M. Bamba and H. Ishihara, "DRASTIC INTERPLAY BETWEEN DEPHASING AND OPTICAL PROCESSES OF CONFINED EXCITONS", DPC07, 16th International Conference on Dynamical Processes in Excited States of Solids, Mo-P5-03, Segovia, Spain, June 17-22, 2007
- 59) M. Bamba and H. Ishihara, "QED THEORY FOR WEAKLY CONFINED EXCITONS WITH RADIATIVE RELAXATION", The 10th Conference on the "Optics of Excitons in Confined Systems" (OECS 10), La Playa Hotel, Messina-Patti, Italy, September 10-13, 2007
- 60) T. Iida and H. Ishihara, "Theory of Spectroscopy and Microscopy with Resonant Radiation Force", CLEO/Europe-IQEC 2007 (Conference on Lasers and Electro-Optics/ International Quantum Electronics Conference) (in International Congress Centre Munich, Munich, Germany, June 17-22, 2007)
- 61) T. Iida and H. Ishihara, "Super Interparticle Radiation Force by Excitation of Collective Modes of Polaritons in Heterogeneous Quantum Dots", The 10th Conference on the "Optics of Excitons in Confined Systems" (OECS 10) (in La Playa Hotel, Messina-Patti, Italy, September 10-13, 2007)
- 62) H. Ishihara, H. Yasuda, M. Ichimiya, M. Ashida and T. Itoh, "Theoretical study of transient pulse response of multiple-node-type excitons confined in a thin film", 10th Conference on the "Optics of Excitons in Confined systems" (OECS10) Messina-Patti, Italy 10-13 September 2007
- 63) A. Ishikawa and H. Ishihara, "Theory of two-photon nonlinearity by a realistic matter system with many degrees of freedom in a cavity", Conference on Lasers and Electro-Optics/International Quantum Electronics Conference (CLEO/Europe-IQEC2007) Munich, Germany 17-22 June 2007
- 64) H. Oka and H. Ishihara, "Theory of entangled-photon generation via cavity bipolaritons", Conference on Lasers and Electro-Optics/International Quantum Electronics Conference (CLEO/Europe-IQEC2007) Munich, Germany 17-22 June 2007
- 65) H. Oka and H. Ishihara, "Effects of unbound two-exciton states on entangled photons generated from cavity biexciton", 10th Conference on the "Optics of Excitons in Confined systems" (OECS10) Messina-Patti, Italy 10-13 September 2007
- 66) K. Koshino, "Use of a Classical Input for Solving the Quantum Nonlinear Dynamics of Photons", Conference on Lasers and Electro-Optics/International Quantum Electronics Conference (CLEO/Europe-IQEC2007) Munich, Germany 17-22 June 2007
- 67) 越野和樹 (東京医科歯科大学, さきがけ) Use of a Classical Input for Solving the Quantum Nonlinear Dynamics of Photons, APPC10, 浦項工科大学, 8/23

- 68) H. Yasuda, M. Ichimiya, M. Ashida, T. Itoh and H. Ishihara, Real time analysis of nonlinear transient response of weakly confined excitons, The 16th International Conference on Dynamical Process in Excited States of Solids (DPC 07, 2007), the SEK University, (Segovia, Spain) 2006/6/17
- 69) M. Ichimiya, M. Ashida, H. Yasuda, H. Ishihara and T. Itoh, "Femtosecond-class radiative decay of multinode-type excitons in nano-to-bulk crossover regime", 16th International Conference on Dynamical Processes in Excited States of Solids (DPC07) SEK University (Segovia, Spain) June 18, 2007
- 70) Kanno, T. Isu, O. Kojima, J. Ishi-Hayase, M. Sasaki and M. Tsuchiya, "Optical response of weakly confined excitons in GaAs thin films", 5th International Symposium on Nanotechnology (Tokyo, 2007.2.20-21) P3-18, p.176.
- 71) Kannno, R. Katouf, O. Kojima, J. Ishi-Hayase, M. Sasaki, M. Tsuchiya and T. Isu, "Photoluminescence Dynamics of weakly confined Excitons in GaAs Thin Films", International Conference on Dynamical Processes in Excited States of Solids (DPC07), Segovia Spain, 2007.6.18-22.
- 72) O. Kojima, T. Isu, J. Ishi-Hayase, A. Kannno, R. Katouf, M. Sasaki, and M. Tsuchiya, "Decay of Orientational Grating of Weakly Confined Excitons in GaAs Thin Films", International Conference on Dynamical Processes in Excited States of Solids (DPC07), Segovia Spain, 2007.6.18-22.
- 73) O. Kojima, T. Isu, J. Ishi-Hayase, A. Kannno, R. Katouf, M. Sasaki, and M. Tsuchiya, "Effects of Excitation Spectral Width on Decay Profile of Weakly Confined Excitons", International Conference on Dynamical Processes in Excited States of Solids (DPC07), Segovia Spain, 2007.6.18-22.
- 74) O. Kojima, T. Isu, J. Ishi-Hayase, A. Kanno, R. Katouf, M. Sasaki, and M. Tsuchiya, "Spectral Width Dependence of Residual Carrier Effect on Nonlinear Optical Response of Weakly Confined Excitons", 34th International Symposium on Compound Semiconductors, (Kyoto 2007.10-15-18).
- 75) S. Nagano, K. Suizu, Y. Sugiura, R. Shimizu, K. Edamatsu, and H. Ito, "Generation of cross-polarized photon pairs in a 800-nm band via Type II parametric down-conversion using a periodically poled Lithium Niobate", The 16th International Symposium on the Application of Ferroelectrics (ISAF2007), Nara, Japan May 27-31, 2007.
- 76) T. Yamaguchi, R. Shimizu, Y. Mitsumori, H. Kosaka, and K. Edamatsu, "Generation of polarization entanglement utilizing spatially correlated photon pairs from spontaneous parametric down-conversion", The International Quantum Electronics Conference (IQEC), Munich, Germany, June 17-22, 2007.
- 77) R. Shimizu, T. Yamaguchi, Y. Mitsumori, H. Kosaka, and K. Edamatsu, "Polarization entanglement converted from spatially correlated photon pairs", The Ninth Rochester Conference on Coherence and Quantum Optics (CQ09), Rochester, U.S.A., June 10-15, 2007.

- 78) N. Matsuda, R. Shimizu, Y. Mitsumori, H. Kosaka, and K. Edamatsu, "Measurement of cross-Kerr Nonlinearity Induced by a few photons in a photonic crystal fiber", The Ninth Rochester Conference on Coherence and Quantum Optics (CQ09), Rochester, U.S.A., June 10-15, 2007.
- 79) H. Kosaka, H. Shigyou, Y. Mitsumori, Y. Rikitake, H. Imamura, T. Kutsuwa, and K. Edamatsu, "Coherent spin quantum state transfer from photons to electrons in a semiconductor", The 17th International Conference on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems (EP2DS-17), Genova, Italy, July 15-20, 2007.

2. 国内会議

2003年

- 1) 飯田琢也、石原一、"量子力学的共鳴条件下におけるナノ物質光マニピュレーション、液体ヘリウム中での操作に対する考察" 第14回光物性研究会、(於、大阪市立大学、2003/12/05~12/06)
- 2) 越野和樹、"Quantum Zeno effect in non-ideal measurement processes", 場の量子論の基礎的諸問題と応用、京都大学基礎物理学研究所、2003年12月24日
- 3) 越野和樹、石原一、"Two-photon nonlinearity by nano-structured material in cavity" 2004年12月4日、第15回光物性研究会、京都大学吉田キャンパス
- 4) 三船洋嗣、石原一、"らせん型励起子の光学応答" 第14回光物性研究会、(於、大阪市立大学、2003/12/05~12/06)
- 5) 矢垣真也、石原一、"輻射場の空間構造による閉じ込め励起子の輻射緩和の制御" 第14回光物性研究会、(於、大阪市立大学、2003/12/05~12/06)
- 6) 大畠悟郎、宮島顕祐、籠谷勇児、芦田昌明、枝松圭一、伊藤正、"CuCl 量子ドットにおける励起子分子の二光子共鳴励起現象" 第14回光物性研究会 大阪市立大学 平成15年12月6日.
- 7) 籠谷勇児、大畠悟郎、宮島顕祐、齋藤伸吾(独立行政法人通信総合研究所関西先端研究センター)、芦田昌明、枝松圭一、伊藤正、"CuCl 量子ドットでの2光子共鳴励起による励起子分子状態からのレーザー発振" 第14回光物性研究会 大阪市立大学 平成15年12月6日.
- 8) 籠谷勇児、宮島顕祐、大畠悟郎、芦田昌明、齋藤伸吾(独立行政法人通信総合研究所関西先端研究センター)、枝松圭一、伊藤正、"量子ドットでの2光子共鳴励起による励起子分子状態からのレーザー発振" 日本物理学会 第59回年次大会 九州大学箱崎キャンパス 平成15年3月30日.
- 9) 高田真宏、長谷川充、飯田琢也、石原一、芦田昌明、伊藤正、"MBEによるCuCl薄膜の成長条件とその光学特性" 第14回光物性研究会 大阪市立大学 平成15年12月5日.
- 10) 長谷川充、高田真宏、飯田琢也、石原一、芦田昌明、伊藤正、"MBE法によるCuClナノ構

造の成長条件とその光学特性 ” 日本物理学会 第59回年次大会 九州大学箱崎キャンパス 平成 15 年 3 月 30 日.

- 11) 堀井拓、平井豪(大阪電通大 AFPC)、南口勝、大野宜人(大阪電通大 AFPC)、芦田昌明、伊藤正, “ZnO,Zn 蛍光体のカソードルミネッセンス” 日本物理学会 第59回年次大会 九州大学箱崎キャンパス 平成 15 年 3 月 30 日.
- 12) 南口勝、芦田昌明、伊藤正, “半導体 / 誘電体多層膜における擬似位相整合第二高調波発生とフォニックバンド効果” 日本物理学会 第59回年次大会 九州大学箱崎キャンパス 平成 15 年 3 月 30 日.

2004 年

- 13) 安食博志, 越野和樹, 石原一, “共振器 - ナノ構造結合系を用いた高効率非線形位相シフトの理論”, 2004 年 10 月 4 日, JST”新しい物理現象や動作原理に基づく名のデバイスシステムの創生”研究領域シンポジウム, アルカディア市谷
- 14) 飯田琢也、石原一、稲葉和宏、片山浩一、芦田昌明、伊藤正, “共鳴光誘起力学的相互作用によるナノマニピュレーション, 理論と実験”, 2004 年 10 月 4 日, JST”新しい物理現象や動作原理に基づくナノデバイス・システムの創製”研究領域シンポジウム、アルカディア市谷
- 15) 飯田琢也、石原一、”量子ドット間に生じる輻射力とポラリチック分子形成”, 第15回光物性研究会、(於、京大百周年記念館2F 国際交流ホール 2004/12/03 ~ /12/04)
- 16) 越野和樹, 石原一, “多自由度非線形媒質による2光子非線形性”2004 年 9 月 13 日, 日本物理学会 2004 年秋季大会, 青森大学
- 17) 金野敏和、安食博志、石原一, “励起子活性媒質で均一コートした誘電体微小球の光学応答”、第 15 回光物性研究会, (於、京都大学百周年記念館2F 国際交流ホール 2004/12/03 ~ /12/04)
- 18) 三船洋嗣、飯田琢也、石原一, “らせん型励起子の非線形光学応答”日本物理学会 2004 年春季第 59 回年次大会 (九州大学)
- 19) 籠谷勇児、宮島顕祐、大畠悟郎、齋藤伸吾、芦田昌明、枝松圭一、伊藤正, “半導体ナノ結晶における励起子分子の2光子励起によるレーザー発振” ナノ学会 (東京、学術総合センター一橋記念講堂、平成 16 年 5 月 9-10 日)
- 20) 籠谷勇児、宮島顕祐、齋藤伸吾、芦田昌明、伊藤正, “CuCl 量子ドットにおける強励起下での励起子分子発光の時間分解測定” “第15回光物性研究会(京都、2004年12月3~4日)
- 21) 長谷川充、一宮正義、飯田琢也、石原一、芦田昌明、伊藤正, “CuCl ナノ構造における弱閉じ込め励起子系の四光波混合信号の増強効果” 第15回光物性研究会(京都、2004年12月3~4日)
- 22) 堀井拓、平井豪、澤田祐志、南口勝、一宮正義、大野宜人、芦田昌明、伊藤正, “ZnO,Zn 蛍光体の電子線励起における発光特性” 第15回光物性研究会(京都、2004年12月3~4日)

- 23) 宮島顕祐、籠谷勇児、大畠悟郎、芦田昌明、枝松圭一、伊藤正, “ CuCl 量子ドットにおける励起子分子の二光子共鳴励起現象 III ” 日本物理学会秋の分科会(青森大学、平成16年9月12-15日)
- 24) 宮島顕祐、籠谷勇児、大畠悟郎、芦田昌明、枝松圭一、伊藤正, “ 二光子共鳴励起法による CuCl 量子ドット中の閉じ込め励起子分子に関する研究 ” 第15回光物性研究会(京都、2004年12月3~4日)
- 25) T. Isu, K. Akiyama, N. Tomita, T. Nishimura, Y. Nomura; “ Ultrafast and efficient nonlinear response of AlGaAs/AlAs multilayer structure for the optical Kerr gate switch ”, The 23rd Electronic Materials Symposium, H13, p.231-232 (Izu-nagaoka, Japan, 2004/7/7~7/9).
- 26) 大畠悟郎, 枝松圭一, “ ハイパーパラメトリック散乱による量子もつれ光子対の生成 ”, 第42回茅コンファレンス, 宮城蔵王, 2004年8月22-25日
- 27) 大畠悟郎, 清水亮介, 枝松圭一, 伊藤正, “ CuCl における励起子分子からの量子もつれ光子対生成 ”, 第15回光物性研究会, 京都, 2004年12月3-4日
- 28) 清水亮介, 枝松圭一, “ Diffraction and interference of spatially entangled photon pairs generated by spontaneous parametric down-conversion ”, 第42回茅コンファレンス, 宮城蔵王, 2004年8月22-25日

2005年

- 29) 安食 博志, 石原 一, “ 共振器 QED によるもつれあい光子対生成の計算 ”, 日本物理学会 2005 秋季大会、(於,同志社大京田辺キャンパス 2005/9/19~9/22), 20pPSA-25
- 30) 安食 博志, 石原 一, “ 共振器中の量子井戸による相関 2 光子対生成効率の計算 ”, 第16回光物性研究会(於,大阪市立大学, 2005年12月10日)
- 31) 保田 英樹, 石原 一, “ 励起子閉じ込め複合薄膜における非線形応答の実時間解析 ”, 第16回光物性研究会(於,大阪市立大学, 2005年12月10日)
- 32) 越野 和樹, 石原 一, “ Drastic effects of damping mechanisms on $\chi^{(3)}$ ”, 第16回光物性研究会大阪市立大学, 2005年12月10日
- 33) 馬場 基彰, 石原 一, “ CuCl 薄膜による量子もつれ光子対生成の理論研究 ”, 第16回光物性研究会 (於,大阪市立大学, 2005年12月10日)
- 34) 一宮 正義、長谷川 充、石原 一、芦田 昌明、伊藤 正, “ CuCl ナノ構造における非線形光学応答の増強 ”, ナノ学会第3回大会(於,仙台市民会館、2005年5月8-10日), PS1-57
- 35) 稲葉 和宏、今和 泉啓、片山 浩一、芦田 昌明、伊藤 正, “ 超流動ヘリウム中における CuCl ナノ微粒子の作製 ”, 日本物理学会 2005 年秋季大会(於,同志社大学京田辺キャンパス、2005/9/19~9/22) 20pPSB-4

- 36) 澤田 祐志、一宮 正義、芦田 昌明、下村 哲、冷水 佐壽、伊藤 正, “電子線励起によるピラミッド型 GaAs/AlGaAs の発光特性”, ナノ学会第3回大会(於, 仙台市民会館、2005年5月8-10日), PS1-58
- 37) 澤田 祐志、一宮 正義、芦田 昌明、下村 哲、冷水 佐壽、伊藤 正, “GaAs/AlGaAs ピラミッド型構造におけるカソードルミネッセンス特性”, 日本物理学会2005年秋季大会(同志社大学京田辺キャンパス、2005/9/19~9/22), 20pPSB-9
- 38) 宮島 顕祐、箆谷 勇児、齋藤 伸吾、芦田 昌明、伊藤 正, “半導体ナノ結晶中の励起子分子ダイナミクスとレーザー発振現象”, ナノ学会第3回大会(於, 仙台市民会館2005年5月8-10日), PS1-56
- 39) Toshiro Isu, Koichi Akiyama, Nobuyuki Tomita, Tetsuya Nishimura, Yoshinori Nomura and Kyozo Kanamoto, “Optical Kerr gate switching by the two-photon resonant nonlinear response using AlGaAs/AlAs multilayer structures”, 24th Electronic Materials Symposium, (Matsuyama 2005/7/4~7/6), J5..
- 40) 小島 磨、井須 俊郎、早瀬(伊師) 潤子、土屋 昌弘, “過渡回折法による GaAs 薄膜弱閉じ込め励起子の緩和測定”, 第16回光物性研究会, (於, 大阪, 2005年12月9-10日), III-B-96.
- 41) 清水亮介, 枝松圭一, “二光子回折・干渉における空間相関効果”, 第13回量子情報技術研究会(QIT13), 仙台, 2005年11月24日
- 42) 清水亮介, 枝松圭一, “量子もつれ光子対の回折・干渉における空間相関効果”, 第16回光物性研究会, 大阪, 2005年12月9-10日
- 43) 松田信幸, 清水亮介, 三森康義, 小坂英男, 枝松圭一, “偏光サニャック干渉計を用いた相互位相変調誘起位相シフトの測定”, 第16回光物性研究会, 大阪, 2005年12月9-10日
- 44) 田中隆介, 三森康義, 南不二雄, 小坂英男, 枝松圭一, “半導体量子構造の励起子の時間分解フォトンエコー”, 第16回光物性研究会, 大阪, 2005年12月9-10日
- 45) 米澤元, 執行英樹, 久津輪武史, 新井宏一郎, 三森康義, 小坂英男, 枝松圭一, “時間分解カー回転測定による半導体量子井戸中の電子スピンの動的特性”, 第16回光物性研究会, 大阪, 2005年12月9-10日
- 46) 三森康義, 田中隆介, 小林恭輔, 小坂英男, 枝松圭一, 赤羽浩一, 山本直克, 大谷直毅, “InAs系自己形成量子ドット中の励起子四光波混合”, 第16回光物性研究会, 大阪, 2005年12月9-10日
- 47) 中村春樹, 大畠悟郎, 三森康義, 小坂英男, 枝松圭一, 山本直克, 赤羽浩一, “半導体マイクロキャビティにおける光パラメトリック散乱”, 第16回光物性研究会, 大阪, 2005年12月9-10日

2006年

- 48) 安食博志, 石原一 “共振器中の量子ドットによるもつれあい光子対の生成” 第17

回光物性研究会，大阪，2006年12月8日-9日

- 49) 安食博志、石原一，”共振器により支援されるもつれあい光子対の生成” 第18回光物性研究会、大阪市立大学、2007年12月14日-15日
- 50) 飯田琢也、石原一、”複合外場中のナノ物質が受ける共鳴輻射力の異常変調” 第17回光物性研究会，大阪，2006年12月8日～9日
- 51) 石川陽，井須俊郎，石原一 ”共振器QED系における誘導吸収を用いた2光子位相シフトの理論”第15回量子情報技術研究会 キャンパスプラザ京都 平成18年1月21日
- 52) 石川陽，井須俊郎，石原一 ”共振器QED系での励起子分子効果による2光子非線形性の理論”，第17回光物性研究会，大阪，2006年12月8日～9日
- 53) 石川貴博、飯田琢也、安食博志、石原一，”共鳴光がカーボンナノチューブに及ぼす輻射力の理論”，日本物理学会2006年秋季大会(9月、千葉大学)
- 54) 石川貴博、飯田琢也、安食博志、石原一、”電子的共鳴光とカーボンナノチューブの力学的相互作用の理論”，第17回光物性研究会，大阪，2006年12月8日-8日
- 55) 岡寿樹、石原一 ”励起子分子共振器QEDによるもつれ合い光子生成における2励起子散乱状態の影響”，第15回量子情報技術研究会、キャンパスプラザ京都、2006/11/21
- 56) 岡寿樹、石原一 ”散乱 束縛2励起子状態が共存する共振器 bipolariton によるもつれ合い光子対生成の理論”，第17回光物性研究会，大阪，2006年12月8日～9日
- 57) 合田健太、飯田琢也、東海林篤、石原一，”一次元マイクロ構造体の幾何学的共鳴を利用した磁気光学効果の制御” 第18回光物性研究会、大阪市立大学、2007年12月14日-15日
- 58) 越野和樹，”Semiclassical Evaluation of Two-Photon Cross-Kerr Effect”，第17回光物性研究会，大阪，2006年12月8日-9日
- 59) 谷口和也，安食博志，石原一，”共振器QEDで求めた基底で展開された3次非線形応答のスペクトル構造” 日本物理学会2006年秋季大会(9月、千葉大学)
- 60) 鄭豪、石原一，”円環を単位とする分子集合系における励起メカニズム” 第18回光物性研究会、大阪市立大学、2007年12月14日-15日
- 61) 馬場 基彰，石原 一，”励起子分子散乱による量子もつれ光子対生成の理論研究”，日本物理学会2006年年次大会（於、愛媛大学、2006/3/22 - 3/26），28aPS-28
- 62) 馬場基彰，石原一 ”全量子論的な微視的非局所理論におけるGreen関数法”，第17回光物性研究会，大阪，2006年12月8日～9日
- 63) 保田英樹、一宮正義、芦田昌明、伊藤正、石原一，”超平坦CuCl薄膜における超高速励起子輻射緩和の実時間解析” 第17回光物性研究会，大阪，2006年12月8日

～ 9 日

- 64) 吉水聖、飯田琢也、石原一、”量子ドットに複数集光ビームが及ぼす共鳴輻射力の理論” 第 17 回光物性研究会，大阪，2006 年 12 月 8 日-9 日
- 65) 一宮正義、芦田昌明、伊藤正、飯田琢也、保田英樹、石原一，”ナノ構造と光の長距離結合効果に基づく特異な光機能” ナノテクノロジー分野別バーチャルラボ成果報告会” ナノテクは進化する” (7 月、東京国際フォーラム)
- 66) 稲葉和宏、今和泉啓、片山浩一、一宮正義、芦田昌明、飯田琢也、石原一、伊藤正，”超流動ヘリウム中における CuCl ナノ微粒子の光マニピュレーション” ナノ学会第 4 回大会，京都大学百周年時計台記念館（京都市）2006 年 5 月 20 日
- 67) 今和泉啓、稲葉和宏、一宮正義、芦田昌明、伊藤正，”CuCl ナノ微粒子作製におけるアブレーション条件” 第 17 回光物性研究会，大阪，2006 年 12 月 8 日～ 9 日
- 68) 櫻井康平、籠谷勇児、宮島顕祐、齋藤伸吾、芦田昌明、伊藤正，”CuCl 量子ドットにおける励起子分子発光の光カーゲート時間分解測定” 日本物理学会 2006 年秋季大会，千葉大学（千葉市）2006 年 9 月 25 日
- 69) 澤田祐志、一宮正義、芦田昌明、下村哲、冷水佐壽、伊藤正，”高空間分解能による GaAs/AlGaAs ピラミッド型キャップ構造のカソードルミネッセンス特性” ナノ学会第 4 回大会，京都大学百周年時計台記念館（京都市）2006 年 5 月 19 日
- 70) 澤田祐志、一宮正義、芦田昌明、尾崎信二、下村哲、伊藤正，”GaAs/AlGaAs 単層ピラミッド型キャップ構造のナノスケール空間分解カソードルミネッセンス特性”，第 17 回光物性研究会，大阪，2006 年 12 月 8 日～ 9 日
- 71) 十倉祐紀、一宮正義、澤田祐志、芦田昌明、伊藤正，”ZnO,Zn 微結晶におけるカソードルミネッセンスの増強” ナノ学会第 4 回大会，京都大学百周年時計台記念館（京都市）2006 年 5 月 20 日
- 72) 宮島顕祐、籠谷勇児、櫻井康平、齋藤伸吾、芦田昌明、伊藤正，”二光子共鳴励起下による CuCl 量子ドット中の励起子分子超高速発光” 第 17 回光物性研究会，大阪，2006 年 12 月 8 日～ 9 日
- 73) Kojima, T. Isu, J. Ishi-Hayase, M. Sasaki and M. Tsuchiya, “Nonlinear optical response of excitons in GaAs nano-thin films”, 第 4 回ナノテクノロジー総合シンポジウム (Japan Nano 2006), (於,東京,2006 年 2 月 20-21 日), P-3-8.
- 74) O. Kojima, T. Isu, J. Ishi-Hayase, M. sasaki and M. Tsuchiya, “Ultrafast nonlinear optical response of weakly confined excitons”, 25th Electron Material Symposium (Izu-Nagaoka, 2006.7.5-7) L7, pp.310-311.
- 75) 菅野敦史、井須俊郎、小島磨、早瀬（伊師）潤子、佐々木雅英、土屋昌弘，”GaAs 薄膜閉じ込め励起子の時間分解分光”，第 17 回光物性研究会，(大阪，2006 年 12 月 8 日～ 9 日)。
- 76) 小島磨、井須俊郎、早瀬（伊師）潤子、佐々木雅英、土屋昌弘，”弱閉じ込め励起

子による非線形光学応答”，第17回光物性研究会，(大阪，2006年12月8日～9日)。

- 77) 金大貴，石原一，中山正昭 ”真空蒸着 PbI₂ 薄膜における励起子重心運動閉じ込め” 日本物理学会 2006 年秋季大会(9 月、千葉大学)
- 78) 小林恭輔，三森康義，小坂英男，枝松圭一，“顕微ヘテロダイナミックポンププローブ法による単一量子ドットの時間分解分光”，日本物理学会 2006 年秋季大会，千葉，2006 年 9 月 25 日
- 79) 加藤範泰，三森康義，小坂英男，枝松圭一，山本直克，赤羽浩一，“半導体微小共振器の励起子ポラリトンのポンプ&プローブ分光”，日本物理学会 2006 年秋季大会，千葉，2006 年 9 月 25 日
- 80) 三森康義，小坂英男，枝松圭一，赤羽浩一，山本直克，佐々木雅英，大谷直毅，“InAs 系自己形成量子ドット中の励起子四光波混合 III”，日本物理学会 2006 年秋季大会，千葉，2006 年 9 月 25 日
- 81) 大畠悟郎，清水亮介，枝松圭一，“CuCl における励起子分子からの量子もつれ光子対生成 II，Bell の不等式の検証”，第 17 回光物性研究会，大阪，2006 年 12 月 8-9 日
- 82) 執行英樹，上野若菜，久津輪武史，新井宏一郎，三森康義，小坂英男，枝松圭一，“光子-スピン量子状態転写のための GaAs 系量子井戸における電子スピンの光学応答測定”，第 17 回光物性研究会，大阪，2006 年 12 月 8-9 日
- 83) 金城英人，久津輪武史，新井宏一郎，小坂英男，枝松圭一，“光子スピン量子状態転写のための量子輸送測定による GaAs 系量子構造の単一電子 g 因子評価”，第 17 回光物性研究会，大阪，2006 年 12 月 8-9 日
- 84) 小林恭輔，三森康義，小坂英男，枝松圭一，“顕微ヘテロダイナミックポンププローブ法による単一量子ドットの時間分解分光”，第 17 回光物性研究会，大阪，2006 年 12 月 8-9 日
- 85) 杉浦 洋平，清水 亮介，枝松 圭一，長能 重博，杉山 卓，水津 光司，伊藤 弘昌，“擬似位相整合を用いた高効率な 2 光子生成デバイスの作製と評価”，第 17 回光物性研究会，大阪，2006 年 12 月 8-9 日
- 86) 山口貴司，清水亮介，三森康義，小坂英男，枝松圭一，“パラメトリック下方変換における空間相関効果を利用した偏光量子もつれ光子対の生成”，第 17 回光物性研究会，大阪，2006 年 12 月 8-9 日
- 87) 加藤範泰，三森康義，小坂英男，枝松圭一，山本直克，赤羽浩一，“半導体マイクロキャビティにおける光パラメトリック散乱”，第 17 回光物性研究会”，大阪，2006 年 12 月 8-9 日
- 88) 西岡崇，若生周治，大畠悟郎，金大貴，溝口幸司，枝松 圭一，中山 正昭，“真空蒸着法による高品位 CuCl 薄膜の作製と励起子分子共鳴ハイパーパラメトリック散乱”，第 17 回光物性研究会，大阪，2006 年 12 月 8-9 日

2007 年

- 89) 安食博志，石原一，“もつれあい光子対生成における共振器 QED の効果”，ナノテク

デバイス研究会, 産業技術総合研究所(筑波), 2007.7.9-10.

- 90) 安食博志, "もつれあい光子対生成における共振器 QED の効果" CREST "光電場のナノ空間構造による新機能デバイスの創製" シンポジウム(兵庫県立淡路夢舞台国際会議場,2007.3.1-3).
- 91) 飯田琢也, 稲葉和宏, 片山浩一, 一宮正義, 芦田昌明, 石原一, 伊藤正, "共鳴ナノ光マニピュレーション", ナノテクデバイス研究会, 産業技術総合研究所(筑波), 2007.7.9-10.
- 92) 石川陽, 井須俊郎, 石原一, "多原子 共振器 QED 系での誘導吸収による 2 光子非線形ダイナミクス" 第 16 回 量子情報技術研究会, NTT 厚木研究開発センター, 2007 年 5 月 17 日-18 日
- 93) 石川陽, 石原一, "最大限の 2 光子非線形性を実現するための複数原子 - 共振器 QED 系に対する理論的設計指針", ナノテクデバイス研究会, 産業技術総合研究所(筑波), 2007.7.9-10.
- 94) 石川陽, 石原一, "N 量子ドット励起子分子系における超放射の理論" 第 18 回光物性研究会, 大阪市立大学, 2007 年 12 月 14 日-15 日
- 95) 石川貴博, "カーボンナノチューブの共鳴光マニピュレーションの理論" CREST "光電場のナノ空間構造による新機能デバイスの創製" シンポジウム(兵庫県立淡路夢舞台国際会議場,2007.3.1-3).
- 96) 石川貴博, 飯田琢也, 安食博志, 石原一, "単層カーボンナノチューブ中励起子の共鳴条件下における輻射力の理論" 第 18 回光物性研究会, 大阪市立大学, 2007 年 12 月 14 日-15 日
- 97) 江口弘樹, 飯田琢也, 石原一, "キラリティーを有する有機分子に円偏光が及ぼす共鳴輻射力の理論" 第 18 回光物性研究会, 大阪市立大学, 2007 年 12 月 14 日-15 日
- 98) 岡寿樹, 石原一, "励起子分子共振器 bipolariton の四光波混合応答の理論解析", 日本物理学会 2007 年春季大会 (於, 鹿児島大学 郡元キャンパス 2007/3/18 ~ 3/21)
- 99) Hisaki Oka and Hajime Ishihara, "Theoretical analysis of four-wave-mixing response of cavity bipolaritons", 第 18 回光物性研究会, 大阪市立大学, 2007 年 12 月 14 日-15 日
- 100) 奥川陽介, 馬場基彰, 石原一, "DBR 共振器における励起子固有モードと状態密度" 第 18 回光物性研究会, 大阪市立大学, 2007 年 12 月 14 日-15 日
- 101) 葛原聡, 石原一, "複合フォトニック結晶構造の電場増幅による第二高調波増強効果" 第 18 回光物性研究会, 大阪市立大学, 2007 年 12 月 14 日-15 日
- 102) 越野和樹, "Use of classical input for solving nonlinear dynamics of photons" CREST "光電場のナノ空間構造による新機能デバイスの創製" シンポジウム(兵庫県立淡路夢舞台国際会議場,2007.3.1-3).

- 103) 谷口和也, "共振器 QED で求めた基底で展開された 3 次非線形応答のスペクトル構造" CREST "光電場のナノ空間構造による新機能デバイスの創製" シンポジウム(兵庫県立淡路夢舞台国際会議場, 2007.3.1-3).
- 104) 馬場基彰(阪大基礎工, CREST-JST), 石原一(阪府大工, CREST-JST), "弱閉じ込め励起子の輻射緩和および位相緩和の理論" 日本物理学会第 62 回年次大会 23pPSA-104, 北海道大学札幌キャンパス, 2007 年 9 月 21-23 日
- 105) 馬場基彰, 石原一, "励起子輻射緩和理論, 弱閉じ込めとバルクの境界" 第 18 回光物性研究会, 大阪市立大学, 2007 年 12 月 14 日-15 日
- 106) 吉水聖, "複数集光ビームがナノ微粒に及ぼす共鳴輻射力の理論" CREST "光電場のナノ空間構造による新機能デバイスの創製" シンポジウム(兵庫県立淡路夢舞台国際会議場, 2007.3.1-3).
- 107) 吉水聖, 飯田琢也, 石原一, "励起子共鳴条件下で複数ラゲルガウスビームが量子ドットに及ぼす輻射力の理論" 第 18 回光物性研究会, 大阪市立大学, 2007 年 12 月 14 日-15 日
- 108) 一宮正義, 芦田昌明, 保田英樹, 石原一, 伊藤正, "CuCl ナノ構造における超高速非線形光学応答" ナノ学会第 5 回大会 つくば国際会議場(つくば) 2007 年 5 月 22 日
- 109) 一宮正義, 芦田昌明, 保田英樹, 石原一, 伊藤正, "ナノ構造と光の長距離結合効果による閉じ込め励起子の超高速輻射緩和" ナノテクデバイス研究会, 産業総合技術研究所(つくば), 2007 年 7 月 9 日-10 日
- 110) 稲葉和宏, 市川聡, 一宮正義, 芦田昌明, 伊藤正, 竹田精治, "超流動ヘリウム中でのレーザーアブレーションによる CuCl ナノ微粒の作製と構造観察" ナノ学会第 5 回大会 つくば国際会議場(つくば) 2007 年 5 月 21 日
- 111) 片山浩一, "半磁性半導体 CdMnTe における高密度電子・正孔系と磁性イオンの相互作用" CREST "光電場のナノ空間構造による新機能デバイスの創製" シンポジウム(兵庫県立淡路夢舞台国際会議場, 2007.3.1-3).
- 112) 櫻井康平, "CuCl 量子ドットにおける励起子分子発光の光カーゲート時間分解測定" CREST "光電場のナノ空間構造による新機能デバイスの創製" シンポジウム(兵庫県立淡路夢舞台国際会議場, 2007.3.1-3).
- 113) 澤田祐志, "GaAs/AlGaAs 単層ピラミッド型キャップ構造における空間分解低温カソードルミネッセンス特性" CREST "光電場のナノ空間構造による新機能デバイスの創製" シンポジウム(兵庫県立淡路夢舞台国際会議場, 2007.3.1-3).
- 114) 澤田祐志, 一宮正義, 芦田昌明, 尾崎信二, 下村哲, 伊藤正, "ナノメートルスケール低温カソードルミネッセンス分光法を用いた GaAs/AlGaAs ピラミッド型キャップ構造の局所的発光特性の評価" 第 68 回応用物理学会学術講演会 北海道工業大学(札幌) 2007 年 9 月 6 日
- 115) 宮島顕祐, "Transition between Rydberg 1s and 2p Exciton states of Biexcitons

in Semiconductor Quantum Dots” CREST” 光電場のナノ空間構造による新機能デバイスの創製” シンポジウム(兵庫県立淡路夢舞台国際会議場,2007.3.1-3).

- 116) 宮島頭祐、井上健介、一宮正義、芦田昌明、伊藤正, “水中でのレーザーアブレーション法により作製された ZnO 微粒子の光学特性” ナノ学会第5回大会 つくば国際会議場(つくば) 2007年5月22日
- 117) 望月敬太, “CuCl 薄膜の弱閉じ込め系における縮退四光波混合信号の増強” CREST” 光電場のナノ空間構造による新機能デバイスの創製” シンポジウム(兵庫県立淡路夢舞台国際会議場,2007.3.1-3).
- 118) 望月敬太,一宮正義, 芦田昌明, 伊藤正, “MBE 法の改善による CuCl ナノ薄膜品質の向上とその非線形光学特性” 日本物理学会第 62 回年次大会 北海道大学札幌キャンパス(札幌) 2007年9月23日
- 119) 望月敬太、一宮正義、芦田昌明、伊藤正, “CuCl 弱閉じ込め系における縮退四光波混合スペクトル構造の特異な温度依存性” 第 18 回光物性研究会、大阪市立大学、2007年12月14日-15日
- 120) R. Katouf, A. Kanno, O. Kojima, M. Tsuchiya, T. Isu, “Fabrication of GaAs Based devices by wafer fusion”, CREST” 光電場のナノ空間構造による新機能デバイスの創製” シンポジウム(兵庫県立淡路夢舞台国際会議場,2007.3.1-3) p.57.
- 121) 早瀬(伊師)潤子, 赤羽浩一, 山本直克, 鯨岡真美子, 江馬一弘, 佐々木雅英, “量子ドットにおける位相緩和と励起子-フォノン相互作用”, CREST” 光電場のナノ空間構造による新機能デバイスの創製” シンポジウム(兵庫県立淡路夢舞台国際会議場, 2007.3.1-3) p.60.
- 122) 菅野敦史, 井須俊郎, 小島 磨, 早瀬(伊師)潤子, 佐々木雅英, 土屋昌弘, “GaAs 薄膜中弱閉じ込め励起子の発光ダイナミクス”, 日本物理学会 2007年春季大会(鹿児島大学, 2007.3.18-21).
- 123) 小島磨, 井須俊郎, 早瀬(伊師)潤子, 菅野敦史, Redouane Katouf, 佐々木雅英, 土屋昌弘, “弱閉じ込め励起子の非線形光学応答に対する励起子準位間干渉効果”, 日本物理学会 2007年春季大会(鹿児島大学, 2007.3.18-21).
- 124) O. Kojima, T. Isu, J. Ishi-Hayase, A. Kanno, R. Katouf, M. Sasaki, and M. Tsuchiya, “Interference effects on degenerate four-wave-mixing signals by weakly confined exciton states”, 26th Electron Material Symposium, Moriyama, 2007.7.4-6.
- 125) A. Kanno, R. Katouf, O. Kojima, J. Ishi-Hayase, M. Tsuchiya, and T. Isu, “Dynamics of excitons weakly confined in GaAs thin films by time-resolved photoluminescence measurements”, 26th Electron Material Symposium, Moriyama, 2007.7.4-6.
- 126) O. Kojima, T. Isu, J. Ishi-Hayase, A. Kanno, R. Katouf, M. Sasaki, and M. Tsuchiya, “Interference effects between weakly confined exciton states on exciton dephasing”, ナノテクデバイス研究会, 産業技術総合研究所(筑波), 2007.7.9-10.

- 127) 菅野敦史、Katouf Redouane, 小島磨、早瀬(伊師)潤子、土屋昌弘、井須俊郎、" GaAs 薄膜中の弱閉じ込め励起子の発光ダイナミクスおよび、光カー効果を用いた全光スイッチ応用の検討 ", ナノテクデバイス研究会, 産業技術総合研究所(筑波), 2007.7.9-10.
- 128) R. Katouf, A. Kanno, O. Kojima, J. Ishi-Hayase, M. Tsuchiya and T. Isu, " Fabrication of GaAs based photonic devices by wafer fusion ", ナノテクデバイス研究会, 産業技術総合研究所(筑波), 2007.7.9-10.
- 129) 小島磨、井須俊郎、早瀬(伊師)潤子、菅野敦史、Redouane Katouf, 佐々木雅英、土屋昌弘, " 弱閉じ込め励起子の配向緩和 ", 日本物理学会第 62 回年次大会,北海道大学 札幌, 2007.9.21-24.
- 130) 菅野敦史、Katouf Redouane、小島磨、早瀬(伊師)潤子、土屋昌弘、井須俊郎, " GaAs 薄膜中弱閉じ込め励起子のサブピコ秒光カー効果 ", 第 18 回光物性研究会, II A-48, (大阪市立大学, 2007.12.14-15).
- 131) 渡部真吾、小島磨、喜多隆、和田修、井須俊郎, " スペクトル分解反射型ポンプ・プローブ法による GaAs 薄膜中閉じ込め励起子の過渡応答測定 ", 第 18 回光物性研究会, II A-47, (大阪市立大学, 2007.12.14-15).
- 132) 大畠悟郎, 清水亮介, 枝松圭一, " 半導体における励起子分子から生成される量子もつれ光子対 ", CREST"光電場のナノ空間構造による新機能デバイスの創製"シンポジウム, 淡路, 2007 年 3 月 1-3 日
- 133) 加藤範泰, 三森康義, 小坂英男, 枝松圭一, 山本直克, 赤羽浩一, " 半導体微小共振器の励起子ポラリトンの ポンプ&プローブ分光 ", CREST"光電場のナノ空間構造による新機能デバイスの創製"シンポジウム, 淡路, 2007 年 3 月 1-3 日
- 134) 杉浦洋平, 清水亮介, 枝松圭一, 長能重博, 杉山卓, 水津光司, 伊藤弘昌, " 擬似位相整合 LiNbO3 を用いた 2 光子生成デバイスの作製と量子もつれ光子対の生成 ", CREST"光電場のナノ空間構造による新機能デバイスの創製"シンポジウム, 淡路, 2007 年 3 月 1-3 日
- 135) 山口貴司, 清水亮介, 三森康義, 小坂英男, 枝松圭一, " 空間相関光子対を利用した偏光量子もつれの生成 ", CREST"光電場のナノ空間構造による新機能デバイスの創製"シンポジウム, 淡路, 2007 年 3 月 1-3 日
- 136) J. Zhang, R. Shimizu, Y. Mitsumori, H. Kosaka, and K. Edamatsu, " Quantum state measurement by a ultra-fast balanced homodyne detector in time domain ", CREST"光電場のナノ空間構造による新機能デバイスの創製"シンポジウム, 淡路, 2007 年 3 月 1-3 日
- 137) 三森康義, 小坂英男, 枝松圭一, 赤羽浩一, 山本直克, 佐々木雅英, 大谷直毅, " InAs 系自己形成量子ドット中の励起子四光波混合 ", CREST"光電場のナノ空間構造による新機能デバイスの創製"シンポジウム, 淡路, 2007 年 3 月 1-3 日
- 138) 加藤範泰, 三森康義, 小坂英男, 枝松圭一, 山本直克, 赤羽浩一, " 半導体微小共振

器の励起子ポラリトンのポンプ&プローブ分光 II”，日本物理学会 2007 年春季大会，鹿児島，2007 年 3 月 18-21 日

- 139) 三森康義，小坂英男，枝松圭一，赤羽浩一，山本直克，佐々木雅英，大谷直毅，“InAs 系自己形成量子ドット中の励起子四光波混合 IV”，日本物理学会 2007 年春季大会，鹿児島，2007 年 3 月 18-21 日
- 140) 清水亮介，山口貴司，杉浦洋平，長能重博，水津光司，三森康義，小坂英男，枝松圭一，“パラメトリック下方変換による量子もつれ光子対光源の開発” ナノテクデバイス研究会、産業総合技術研究所(つくば)、2007 年 7 月 9 日-10 日
- 141) 松田信幸，清水亮介，三森康義，小坂英男，枝松圭一，“フォトリック結晶ファイバにおける少数光子誘起非線形位相シフトの測定” ナノテクデバイス研究会、産業総合技術研究所(つくば)、2007 年 7 月 9 日-10 日
- 142) 稲垣卓弘，久津輪武史，三森康義，小坂英男，枝松圭一，“光子から電子スピンへの量子状態転写 スピン状態トモグラフィーの検討”，日本物理学会第 62 回年次大会，札幌，2007 年 9 月 21-24 日
- 143) 今野貴支，久津輪武史，桑原真人，大野圭司，三森康義，小坂英男，枝松圭一，“光子スピン量子状態転写のための g 因子制御量子井戸構造における光応答特性”，日本物理学会第 62 回年次大会，札幌，2007 年 9 月 21-24 日
- 144) 加藤範泰，三森康義，小坂英男，枝松圭一，山本直克，赤羽浩一，“半導体微小共振器の励起子ポラリトンのポンプ&プローブ分光 III”，日本物理学会第 62 回年次大会，札幌，2007 年 9 月 21-24 日
- 145) 加藤範康，三森康義，小坂英男，枝松圭一，山本直克，赤羽浩一，“半導体微小共振器における光誘起カー回転” 第 18 回光物性研究会、大阪市立大学、2007 年 12 月 14 日-15 日
- 146) 松田信幸，清水亮介，三森康義，小坂英男，枝松圭一，“フォトリック結晶ファイバにおける少数光子誘起相互位相変調の測定” 第 18 回光物性研究会、大阪市立大学、2007 年 12 月 14 日-15 日
- 147) 宮原優喜，三森康義，小坂英男，枝松圭一，“時間分解ヘテロダイン顕微分光法による単一量子ドットのラビ振動の観測” 第 18 回光物性研究会、大阪市立大学、2007 年 12 月 14 日-15 日

2008 年

- 148) 井須俊郎，小島磨，早瀬(伊師)潤子，Redouane Katouf，菅野敦史，土屋昌弘，“GaAs 閉じ込め励起子ポラリトンによる超高速光スイッチ”，JST ナノテクノロジー分野別バーチャルラボ成果報告会，PB,6-2 (横浜新都市ホール，2008.1.11)。
- 149) 一宮正義，芦田昌明，保田英樹，石原一，伊藤正，“光波-物質波空間インタープレイによる超高速光応答”，JST ナノテクノロジー分野別バーチャルラボ成果報告会，PB,6-1 (横浜新都市ホール，2008.1.11)。

(4) 特許出願

国内出願 (11 件)

1. 発明者: 伊藤 正、芦田昌明
発明の名称: レーザー装置及びレーザー発振方法
出願人: 独立行政法人科学技術振興機構
出願日: 2004年2月13日
出願番号: 特願2004-37437
2. 発明者: 伊藤 正、芦田昌明
発明の名称: - 族半導体単結晶薄膜およびその製造方法
出願人: 独立行政法人科学技術振興機構
出願日: 2004年2月13日
出願番号: 特願2004-37441
3. 発明者: 伊藤 正、芦田昌明、石原 一、飯田琢也
発明の名称: 量子ドット操作方法および量子ドット生成操作装置
出願人: 独立行政法人科学技術振興機構
出願日: 2004年3月12日
出願番号: 特願2004-071621
4. 発明者: 枝松圭一, 伊藤正
発明の名称: 量子もつれ光子対の生成方法
出願人: 東北大学, 科学技術振興機構
出願日: 2004年4月20日
出願番号: 特願2004-124716
5. 発明者: 石原一、飯田琢也
発明の名称: ナノ物質の操作方法およびその利用
出願人: 独立行政法人科学技術振興機構
出願日: 2004年9月3日
出願番号: 特願 2004-257017
6. 発明者: 枝松圭一, 清水亮介, 松田信幸
発明の名称: 光学非線形性評価装置及び光スイッチング素子
出願人: 科学技術振興機構
出願日: 2005年12月7日
出願番号: 特願2005-353505
7. 発明者: 安食博志, 石原一
発明の名称: 光子対生成装置
出願人: 大阪大学, 大阪府立大学, JST
出願日: 2006年2月17日
出願番号: 特願 2006-041474
8. 発明者: 枝松圭一, 清水亮介
発明の名称: 量子もつれ光子対生成装置, 及び, 量子もつれ光子対生成方法

出願人：科学技術振興機構
出願日：2006年3月3日
出願番号：特願 2006-058437

9. 発明者：枝松圭一，清水亮介，長能重博
発明の名称：量子もつれ光子対生成装置及び量子もつれ光子対生成方法
出願人：科学技術振興機構
出願日：2007年2月28日
出願番号：特願 2007-050408
10. 発明者：石原一，飯田琢也，江口弘樹
発明の名称：キラル物質の異性体分離方法及びその装置
出願人：大阪府立大学，科学技術振興機構
出願日：2007年12月13日
出願番号：特願 2007-322384
11. 発明者：枝松圭一，清水亮介，長能重博
発明の名称：非縮退偏光量子もつれ光子対生成装置及び非縮退偏光量子もつれ光子対生成方法
出願人：科学技術振興機構
出願日：2008年1月25日
出願番号：特願 2008-014938

海外出願 (8件)

1. 発明者：伊藤正、芦田昌明
発明の名称：レーザー装置及びレーザ発振方法
出願人：独立行政法人科学技術振興機構
出願日：2004年8月11日
出願番号：PCT/JP2004/011536
2. 発明者：伊藤正、芦田昌明
発明の名称：I-VII族半導体単結晶薄膜およびその製造方法
出願人：独立行政法人科学技術振興機構
出願日：2004年11月30日
出願番号：PCT/JP2004/017777
3. 発明者：石原一、飯田琢也
発明の名称：ナノ物質の操作方法およびその利用
出願人：独立行政法人科学技術振興機構
出願日：2005年3月3日
出願番号：PCT/JP2005/003637
4. 発明者：伊藤正、芦田昌明、石原一、飯田琢也
発明の名称：量子ドット操作方法および量子ドット生成操作装置
出願人：独立行政法人科学技術振興機構
出願日：2005年3月9日
出願番号：PCT/JP2005/004118
5. 発明者：枝松圭一，伊藤正
発明の名称：量子もつれ光子対の生成方法

出願人：東北大学，科学技術振興機構
出願日：2004年11月2日
出願番号：PCT/JP2004/124716

6. 発明者：安食博志，石原一
発明の名称：PHOTON PAIR GENERATOR
出願人：科学技術振興機構，大阪府立大学，大阪大学
出願日：2006年8月11日
出願番号：PCT/JP2006/315912
7. 発明者：枝松圭一，清水亮介，松田信幸
発明の名称：光学非線形性評価装置及び光スイッチング素子
出願人：科学技術振興機構
出願日：2006年12月6日
出願番号：PCT/JP2006/324359
8. 発明者：枝松圭一，清水亮介，長能重博
発明の名称：量子もつれ光子対生成装置及び量子もつれ光子対生成方法
出願人：科学技術振興機構
出願日：2007年3月1日
出願番号：PCT/JP2007/053974

(5) 受賞等

受賞 (6件)

2004年

1. 受賞者名：飯田琢也
賞の名称：The 1st EXCON prize for best paper (6th International Conference on Excitonic Processes in Condensed Matter (EXCON'04)
受賞日：2004年07月09日
受賞論文：T. Iida and H. Ishihara, Optically-induced force between nano-particles irradiated by electronic resonant light

2006年

2. 受賞者：稲葉和宏
賞の名称：Physica Status Solidi Young Researcher Award (EXCON Prize),
7th International Conference on Excitonic Processes
in Condensed Matter (EXCON 2006),
Wake Forest University (Winston-Salem, NC USA), June 26-30, 2006.
受賞論文：K. Inaba, K. Imaizumi, K. Katayama, M. Ichimiya, M. Ashida, T. Iida,
H. Ishihara and T. Itoh, "Optical manipulation of CuCl nanoparticles
under an excitonic resonance condition in superfluid helium,"
3. 受賞者：稲葉和宏

賞の名称：第 21 回応用物理学会講演奨励賞

受賞論文：“超流動ヘリウム中における量子ドットの作製および
光マニピュレーション”

(稲葉和宏、今和泉啓、片山浩一、一宮正義、芦田昌明、飯田琢也、
石原一、伊藤正、第 67 回応用物理学会学術講演会)

2007 年

4. 受賞者：越野和樹

賞の名称：日本物理学会若手奨励賞（領域 11）9/23

受賞論文：“量子ゼノ効果と測定問題の理論的考察”

“Quantum anti-Zeno effect by false measurements”,
Phys.Rev.Lett.93,030401(2004)

“Quantum Zeno effect by general measurements”,
Phys.Reports 412,191(2005) 他

受賞対象論文の第一所属が CREST

5. 受賞者：馬場基彰

賞の名称：第 18 回光物性研究会奨励賞

受賞論文：“励起子輻射緩和理論，弱閉じ込めとバルクの境界”

(馬場基彰，石原一，第 18 回光物性研究会)

6. 受賞者：飯田琢也

賞の名称：第 24 回井上研究奨励賞

受賞タイトル：ナノ物質と電子的共鳴光の力学的相互作用の理論

受賞日：2008 年 2 月 4 日

新聞報道 (11 件)

1. “情報運ぶ光子のペア 半導体から”，朝日新聞 2004 年 9 月 9 日朝刊
2. “量子もつれ 半導体で生成”，河北新報 2004 年 9 月 9 日朝刊
3. “量子もつれ 半導体で光子発生”，日刊工業新聞 2004 年 9 月 9 日朝刊
4. “半導体で量子もつれ光子対発生”，化学工業日報 2004 年 9 月 9 日朝刊
5. “量子もつれ”，週刊文春 2004 年 9 月 30 日号
6. “Crystal links ultraviolet photons”，The Latest Technology Research News,
October 20/27, 2004
7. “半導体を用いて量子もつれ光子発生”，日経ナノビジネス 2004 年 11 月号
8. 英国物理学会誌 Journal of Physics における誌上インタビュー
a60 seconds with ... 2006 年 4 月
URL, <http://www.iop.org/EJ/journal/-page=featauth/-author=440/0953-8984/1>
9. “光でナノ粒子操作 超流動ヘリウム中でレーザー照射”日刊工業新聞 2006 年 8 月
25 日
10. “芽はぐくむ研究室 ナノ・マクロ間の物理研究 理論と実験でアプローチ”日刊工

業新聞 2006年11月27日

11. “次世代の量子暗号通信 半導体で基幹部品”, 日本経済新聞 2007年4月6日

その他

H. Ishihara and T. Iida,
“Nano Optical Chromatography”,
Frost & Sullivan Research Report, Emerging Technology Developments
in Process and Laboratory Analytical Instruments (Technical Insights),
2005年12月27日

7 研究期間中の主な活動(ワークショップ・シンポジウム等)

年月日	名称	場所	参加人数	概要
平成 15 年 7 月 21 日 ~ 23 日	CREST&QNN03 ジョイント国際ワークショップ	兵庫県立淡路夢舞台国際会議場	100 名	CREST3 チーム及び QNN ジョイントでの研究発表
平成 15 年 12 月 1 日 ~ 2 日	CREST「光電場のナノ空間構造による新機能デバイスの創製」の研究打ち合わせ	大阪大学待兼山会館	27 名	研究チーム内打ち合わせ
平成 16 年 6 月 4 日 ~ 6 日	CREST「光電場のナノ空間構造による新機能デバイスの創製」の研究チーム会議	山形市 KKR 白銀荘	21 名	研究チーム内各グループの最新の成果について発表を行い、今後の共同研究についての打ち合わせ
平成 16 年 11 月 16 日 ~ 17 日	CREST「光電場のナノ空間構造による新機能デバイスの創製」の研究打ち合わせ	東北大学電気通信研究所	8 名	量子位相ゲート研究に関して実験グループと理論グループの共同研究打ち合わせ
平成 17 年 4 月 29 日 ~ 30 日	量子位相ゲート研究に関する共同研究打ち合わせ	大阪府立大学 工学研究科	9 名	研究チーム内打ち合わせと博士研究員候補の面接
平成 17 年 8 月 18 日	超高速非線形応答現象に関する情報交換と研究打ち合わせ	大阪大学大学院 基礎工学研究科	13 名	研究チーム内打ち合わせ
平成 18 年 6 月 2 日 ~ 3 日	CREST「光電場のナノ空間構造による新機能デバイスの創製」研究会	大阪大学大学院 基礎工学研究科	33 名	石原チームの研究会議
平成 19 年 3 月 1 日 ~ 3 日	CREST「光電場のナノ空間構造による新機能デバイスの創製」シンポジウム	兵庫県立淡路夢舞台国際会議場	47 名	CREST 石原チームの成果について発表、討論を行う。またチーム外から複数のゲストを招き、本チームの成果だけでなく、光物理、光デバイスの今後の研究の方向について広く議論し、CREST 後の活動の指針を得る

8 研究成果の展開

(1)他の研究事業への展開

本研究プロジェクトの成果により以下のような新たな研究プロジェクトが展開された。

科学研究費補助金 学術創成研究 「超高効率量子もつれ光源および検出器の創成と量子もつれ回復プロトコルの研究」 研究代表者：枝松圭一(東北大学)、平成 17～21 年度

本チームで世界に先駆けて開発した、半導体を用いた量子もつれ光子の発生技術をさらに発展させ、半導体量子構造や擬似位相整合を用いた非常に高効率な量子もつれ光源および検出器を開発するプロジェクト研究。本チーム量子位相ゲートグループの枝松が研究代表者となり、本チームから石原を初めとする数名が研究分担者として参画している。

徳島大学大学院ソシオテクノサイエンス研究部 フロンティア研究センター ナノマテリアルテクノロジー(日亜寄附)講座 井須俊郎 平成 18 年度～

本チームで行った GaAs 系半導体ナノ構造による超高速非線形応答の研究成果に基づき、これをより一層発展させる研究等を活動の柱とする講座として開講された。

科学研究費補助金 特定領域研究 「光 分子強結合反応場」(代表 三澤弘明) 計画研究「局在電磁場と分子系の空間的インタープレイによる光反応制御の理論」 研究代表者 石原一(大阪府立大学) 平成 19～22 年度

本プロジェクトで展開してきた物質波動と光波動のインタープレイによる新しい物性研究が光化学の分野においても重要な研究課題になり得るとの狙いより、同じ梶村領域の研究代表者である三澤弘明教授が代表を務める上記特定領域研究に石原が計画研究代表として参画。

科学研究費補助金 特定領域研究 「カーボンナノチューブナノエレクトロニクス」(代表 水谷 孝) 計画研究「新型多機能ナノチューブデバイスのデザイン」 研究代表者 安食博志(大阪大学) 平成 19～23 年度

本プロジェクトにおける光マニピュレーション研究に関連して行ってきたカーボンナノチューブにおける光-励起子結合、および共鳴輻射力の研究を一層発展させることを一つの柱とし、理論グループの安食が上記特定領域研究に計画研究代表として参画。

科学研究費補助金 基盤研究(B) 「超流動ヘリウム中における量子ドットの作製と光マニピュレーション」 研究代表者：芦田昌明(大阪大学) 平成19～21年度

本プロジェクトで推進してきた光マニピュレーション研究を基礎科学的観点よりサポートする研究であり、本チームより他に石原、飯田らが参画。

その他、特筆すべきこととして、以下のように本チームの全てのグループから合計5名のさきがけ研究者を輩出した。

科学技術振興機構 さきがけ「光の創成・操作と展開」研究領域 「光伝導アンテナによる光電場の直接検出」 研究代表者：芦田昌明(大阪大学) 平成 17～20 年度 (伊藤グループ)

科学技術振興機構 さきがけ「光の創成・操作と展開」研究領域 「光子数確定パルスの空間制御理論」 研究代表者：越野和樹(東京医科歯科大) 平成 18～21 年度 (理論グループ)

科学技術振興機構 さきがけ「光の創成・操作と展開」研究領域 「量子ドットによる光・量子メモリの創出と高光非線形性の探求」 研究代表者：早瀬潤子(情報通信研究

機構) 平成 19~22 年度
(井須グループ)

科学技術振興機構 さきがけ「光の創成・操作と展開」研究領域 「多光子波束による物質の非線形光学応答」 研究代表者：清水亮介(科学技術振興機構) 平成 19~22 年度
(枝松グループ)

科学技術振興機構 さきがけ「物質と光作用」研究領域 「デザインされた光場によるナノ複合体の力学制御」 研究代表者：飯田琢也(大阪府立大学) 平成 19~22 年度
(理論グループ)

9 他チーム、他領域との活動とその効果

(1)領域内の活動とその効果

領域内の活動を通して、同じ梶村領域の三澤チームとの交流がきっかけとなり、上に述べた三澤教授が代表を務める特定領域研究「光分子強結合反応場」へ研究代表者の石原が計画研究代表として参画することになった。上記特定領域研究テーマにおいて本チームが掲げたコンセプトは光化学分野においても重要であり、この分野への展開が期待されるとの議論が領域内の活動を通して為された。

また、同じ三澤チームの笹木グループとの学術的交流を通して、現在、枝松が代表を務める「学術創成研究」において人的交流があった。本学術創成研究に参画する石原グループの研究員として笹木グループ出身者が「もつれ合い光子対生成の理論」をテーマに活躍している。

10 研究成果の今後の貢献について

(1)科学技術の進歩が期待される成果

フロンティアの開拓や、科学技術のブレークスルーになると思われる成果について、3つの項目に分けて以下に記載する。

【1】半導体閉じ込め励起子による超高速応答に関する成果

戦略目標においては「全く新しい原理を用いた次世代のデバイス・材料の礎を確立することが長期的展望にたった我が国の国際的な技術競争力の確保にとり必要不可欠である」と謳われ、目指すべき成果の一つとして「大容量・超高速の光通信技術に必要な光発生、光変調、光スイッチ、光増幅、光検出、光メモリ、表示などへの革新につながるナノ構造フォトンクスや材料の開発を通じた次世代光技術の創製」が挙げられている。

この目標に呼応して本プロジェクトでは、従来にない巨大な輻射結合を創り出すことによる超高速光学応答機構の実現と、これまでの常識を越えた性能を持つ光スイッチデバ

イス機能の開発を行った。将来、光エレクトロニクスが既存技術を真に革新するためには画期的性能を持つ光非線形性デバイスの実現が不可欠である。しかし多くの場合、物質の非線形性は小さいため、デバイスに使える程度の大きな非線形性を顕す材料や物理的機構を見いだすことが重要な課題となってきた。その中で励起子共鳴効果は非線形性の大きさと動作速度において極めて有望な性能を持つ機構としてこれまで集中的に研究が行われてきた。しかしながら、共鳴効果が本質的に持つ「効率と速度のトレードオフ」や室温での不安定性と位相緩和によるコヒーレンスの擾乱の問題が立ちはだかり、長年の研究にも関わらず実用的デバイスへの道筋が描き切れていない。このような中、本研究はこれまで見逃されがちであったナノからバルクへのクロスオーバー領域において発現する励起子と光の巨大結合効果により位相緩和時間を遙かに凌ぐ輻射緩和時間を実現した。この機構をさらに制御可能なものとできれば、将来的には室温近くにおいてもその本領を発揮し、従来認識されていた性能の限界を突破する光デバイスへ結びつけていけるものと期待される。

【2】共鳴輻射力によるナノ構造運動制御（光マニピュレーション）に関する成果

同様に戦略目標においては「革新的なナノ素材とナノプロセスの開拓、新機能・新特性を持つ超集積素子の実現及び、医療応用・障害克服などに貢献するための集積システムの生体親和性の飛躍的向上」が目指すべき成果の一つとして挙げられている。

本グループで得られた光マニピュレーションの研究成果はこれに呼応したものとなる。現在のナノ構造作製技術に必要とされる重要なブレークスルーの一つは試料の均質性、均一性を確保するための革新的手法である。サイズ、形状等の外部パラメータを制御する手法においては一定の不均一は避けられず、また、製造過程で制御可能な外部パラメータの均一性が、その材料の機能上の均一性に直結する保証も通常は得られない。しかし、本研究によってその可能性を示した、対象の量子力学的個性の発現である共鳴的物質応答を通して試料を選別・操作する方法は、物質の機能に直結する量子力学的性質そのものの均一性を制御する作製技術となるため、上記ブレークスルーへの全く新しいアプローチになり得る。このような技術から生み出される超高均質材料は単に既存機能の性能向上だけでなく、質的にも全く新しい機能を提供する可能性があり、本研究が示した可能性はあらゆる産業の基盤技術になり得、新産業創出に向けた扉が大きく開かれることが期待される。具体例を挙げると次のようなことが期待できる。1) 発光現象の制御による量子ドットレーザーの格段の性能（発光効率、応答速度）向上、高効率単一光子源の獲得、さらにドット集団の線幅の狭窄化により生体マーカの波長選別性を現状より格段に上げることが可能。2) 光操作による有機高分子のキラリ選別が成功すれば、化学・医療産業におけるインパクトは計り知れない。3) ナノ構造の励起ダイナミクスを直接可視化する力学的顕微鏡技術の実現は、能動的機能を持つナノ構造の多くの重要知見を引き出す可能性があり、将来のナノ構造製造技術の欠かせざるツールとなると期待される。すなわち、本研究の成果は吸収線、発光線、キラリティー、励起状態のコヒーレンスなどを直接選別するナノ構造作製技術の全く新しいアプローチを通じた、革新的材料・プロセス技術実現への可能性を示したものと言える。

【3】量子位相ゲート実現への試みに関する成果

さらに戦略目標においては「固体量子ビット素子、超伝導系量子磁束素子、相関電子素子、相関光子素子、スピン制御素子、ナノチューブ・ナノワイヤ素子等、新原理素子の探索及び技術的な壁の打破」が目指すべき成果の一つとして挙げられている。

本研究が世界に先駆けた、半導体を用いた量子もつれ光子の発生技術の開発は、正にこの戦略目標に直接対応するものである。量子相関(量子もつれ)光子発生素子は、量子情報通信技術において最も重要な光源の一つであるが、半導体による量子もつれ光子の発生技術の開発は、将来的には電流励起による量子もつれ光子発生素子へとつながるもので、そのインパクトは非常に大きい。また、本研究で開発した、極少数光子によって誘起される微小な非線形位相シフトの測定技術は、現実的な光学非線形性を利用した量子位相ゲートの実現というブレークスルーにつながるものであり、これも上記の戦略目標に対応する。本研究の成果は、今後の物質開発の進捗を促し、量子位相ゲートの実現に大きく近づく1歩であると考えられる。

(2)社会・経済の発展が期待される成果

戦略目標に謳われる「全く新しい原理を用いた次世代のデバイス・材料の礎を確立することが長期的展望にたった我が国の国際的な技術競争力の確保にとり必要不可欠である」との記述に対応し、本チームの成果を以下のように評価することが出来る。

本プロジェクトで推進された光波動と物質波動のインタープレイに着目した研究は、マクロとミクロの「異なる階層に属する自由度間のリンクから生まれる新規な物理的機構」を生み出す、これまでに発想されたことのない新しい機能発現の源泉を探る研究であり、本研究は、ここから従来の限界を突破するデバイス技術を生み出そうとした。結果として、得られた(従来その両立が原理的に困難と考えられた)高非線形性と超高速応答の高いレベルでの両立する物理機構は、我が国独自の独創的発想から生まれたものであり、今後、この機構に基づいた研究をさらに推進することは長期的展望に立った国際的な技術競争力の確保に資するものと期待できる。

また、本研究プロジェクト以前には「輻射力」と「ナノ系の量子力学的現象」を結びつけるアイデア自体が世界的にも例がなかったため、これを起点とするあらゆる科学的、技術的研究は新規であり、この意味で本研究が際だった独創性を持つものであったことは疑う余地がない。マクロな電磁気学を基礎とした光ピンセットや光マニピュレーション技術が一大分野となり、また量子力学に基づく原子冷却技術も一大分野を形成している。一方、その両端をつなぐナノ領域は、単にそれらの間と位置付けられるだけではなく、対象物質がその双方にはない量子力学的な多自由度(量子力学的空間自由度)を有する点で質的に全く異なる物理を包含しており、また応用上も疑いなく重要である。このことから今後ナノ領域もまた新たな一大分野を築くものと期待できる。さらに、ナノ領域における輻射力の現象を「光ナノファクトリー」の形で製造技術に結びつける発想や、本研究から発展が期待できるレーザーによる非接触・非破壊エナンチオマー分離、素励起の空間構造を可視化する共鳴光による輻射力顕微鏡など、基礎原理、その利用方法、技術的発想の全てが我が国発のオリジナルであり、際だった独創性を有する本研究成果と、今後の発展の可能性は将来の我が国の製造技術における国際競争力の確保に資するものと期待できる。

さらに量子情報通信技術は、従来の古典的情報通信技術の限界を打破し得る全く新しい原理に基づく技術であり、そのための基礎技術の開発は、上記戦略目標に記載されていることに対応する。量子情報通信技術は、近年著しい発展を遂げており、国際的な競争が激化している。そのような中で我が国が国際的な競争力を維持するためには、オリジナルなアイデア、技術を創出・発信していくことが不可欠であり、その意味で、半導体を用いた量子もつれ光子発生技術を開発した意義は大きい。また、本研究では、我が国が世界をリードしてきた固体、半導体の光学応答特性に関する研究分野(光物性物理学)の総合力が根底に流れている。

以上のような基礎的学問分野を重視することは、我が国の長期的、国際的な技術競争力の確保に必要不可欠であり、本チームはその良い成功例であることを強調したい。

11 結び

デバイス創製への基礎として提案した物理的機構自体が新奇な研究対象であり、その意味でどの項目もチャレンジングであった。しかし「内部電場のナノ空間構造」を積極的に活かしたデバイス機能を実際に示すことが出来、また飛躍的な性能向上や新奇機能に結びつく新しい物理的機構を開拓出来た点は、戦略目標に照らし合わせて大いに評価できると考えている。また、デバイス創製を目指したと同時に、基礎研究的要素も強かった故、対象としている物理的機構についての理解の進展、解釈の刷新や一般化などが伴い、目標自体が研究の進展と共にブラッシュアップされて来るという側面もあった。学問的にも新しい分野を拓く極めて独創性の高い成果が得られた。「もつれ合い光子対生成」は枝松の学術創成研究に結びつき、本プロジェクトで主題とした「内部電場のナノ空間構造」を利用した光学現象の開拓にも他グループが本格的に参入し始めた。共鳴光マニピュレーションは化学分野も含め多くのグループに影響を与え、新しい研究の流れが出来はじめている。2光子非線形の問題は、越野により「さきがけ研究」を通して新しい量子光学分野の開拓に繋がられ、また非双極子準位を利用した GaAs 非線形応答は井須による徳島大、情報通信研究機構での新しいプロジェクトの柱として発展させられようとしている。このように、本プロジェクトの成果が多方面に広がりを見せていることにも注目したい。

また、本プロジェクトが CREST の枠組みの中で行われたことによりチーム内の交流が大いに促進された。弱閉じ込め励起子の非線形光学応答について、理論と実験、GaAs系とCuCl系、同じチームの中で、それぞれの違いを浮き彫りにしながら研究を進められたことは問題に対する理解を一層深めることになり、両方のアプローチにおいて重要な成果が得られた。超流動ヘリウム中におけるナノ粒子の光マニピュレーションの発案は、領域内の理論グループとの交流で生まれた。また、量子位相ゲートの実現方法について実験グループと理論グループの密接な議論により、ミーティングの回を追うごとに目指すものの具体性が増していった。本 CREST の研究期間内にそれを形にするまでに至らなかったのは大変残念であるが、今後も一層の協力関係により量子位相ゲートの実現へ向けて努力していきたい。

もう一点強調したいのは、本プロジェクトが構成メンバーの成長と共に進展してきたという側面である。期間中にほとんどのグループが栄転等による研究場所の移動を経験し、グループ主要メンバーの交代も幾度となく行われた。また若手研究者も良く育ち、期間中に新しい研究環境を得た者も少なくない。これはグループ全体が極めて高い活性状態であったことの現れであり、また個人のアクティビティーも高かった結果と言える。一方、場所の移動やメンバーの入れ替えは、途中、研究進度に少なからぬ影響を与えた。しかし、最終的には移動や組織変えによるメンバーの一層の増強により、当初想定以上の成果に繋がったことは喜ぶべきことであると考えている。

最後に、CREST の枠組みの中で総括、アドバイザーの指導、領域事務所スタッフの総力を挙げたサポートの中で、チームが育てられつつ成果を上げてきたとの実感を強く持つ点を指摘したい。必要な時期に柔軟に予算措置を行って戴くなど、成果を上げることに特化した CREST による手厚い財政的、人的支援が戦略的な研究を飛躍的に推し進めたことは言うまでもないが、総括、アドバイザー、領域スタッフの適切な指導と、暖かく時に厳しい眼差しが、実力ある研究グループの集合体が「戦略的」に研究を進めていく上で極めて重要な要素であったことを強調したい。今後、このような CREST 研究制度の良い点が是非何らかの形で引き継がれていくことを心から願うものである。



半導体融着資料作製装置(井須グループ)



2007年3月チームシンポジウム(淡路島)



2004年6月チーム研究会(蔵王)