

五神協同励起プロジェクトの研究成果

目次

| | | |
|-----|---|----|
| 1. | ストロンチウム原子のスピン禁制遷移による量子縮退領域へのレーザー冷却 | |
| 1-1 | ストロンチウム原子のスピン禁制レーザー冷却法の開拓 | 2 |
| 1-2 | ストロンチウム原子のフェルミ同位体に対する磁気光トラップ | 3 |
| 1-3 | 中性原子におけるサイドバンド冷却の開発 | 5 |
| 1-4 | ラムディック領域にある中性原子のリコイルフリー分光 | 6 |
| 2. | 電子正孔系の量子相関効果と非線形光学応答 | |
| 2-1 | 励起子間相互作用と非線形光学応答の研究 | 7 |
| 2-2 | 励起子非線形性の微視的理論 | 9 |
| 2-3 | 極低温高密度電子正孔系の光による生成法と観測法の開拓 | 11 |
| 2-4 | フェムト秒パルスによる ボース縮退した励起子分子波の生成と干渉効果の観測 | 14 |
| 2-5 | Cu ₂ O 光学禁制パラ励起子の高感度観測法の開発 | 15 |
| 3. | 強相関電子系の分光学と光制御機能の探索 | |
| 3-1 | 一次元モット絶縁体 Sr ₂ CuO ₃ における超高速光学非線形性の発見 | 16 |
| 3-2 | 時間分解磁気光学分光法の開拓と磁気緩和ダイナミックスの観測 | 19 |
| 3-3 | テラヘルツパルスによる磁気光学分光法の開発 | 21 |
| 3-4 | 励起子クラスターモデルによる遷移金属酸化物の光学応答の理論 | 22 |
| 4. | 微小光学素子の為の光波操作法の研究 | |
| 4-1 | 結合微小球のフォトニック分子モードの観測 | 23 |

1. ストロンチウム原子のスピンの禁制遷移による量子縮退領域へのレーザー冷却

1-1 ストロンチウム原子のスピンの禁制レーザー冷却法の開拓

サブマイクロケルビン領域の新しいレーザー冷却法を開拓する。

研究成果の概略

アルカリ土類原子に対してスピンの禁制遷移でのレーザー冷却及び磁気光学トラップを実現し(図 1), 常温から 400nK まで 100msec 以内に到達する技術を開発した。さらに、同遷移を用いて、光双極子トラップ中でレーザー冷却を行うスキームを開拓した。光トラップ用の非共鳴レーザー光の周波数をうまく選ぶと、スピンの禁制遷移の上下準位のシュタルクシフトを揃えることができ(図 2)、自由空間と同様にレーザー冷却が可能であることを見出し、冷却遷移周波数のシュタルクシフトが相殺する光双極子トラップを実現した。この手法により磁気光学トラップに捕獲した原子の 90%以上を効率よく光双極子トラップに導入できることを実証した。このシュタルクシフトフリーな光双極子トラップは、スピンの禁制遷移を周波数標準に利用する上でもきわめて優れた特性をもつことも同時に示した。

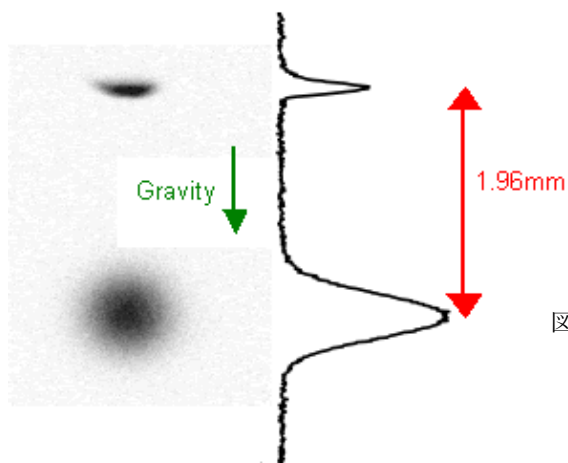


図 1 ストロンチウム原子雲の TOF(Time Of Flight)測定
上はスピンの禁制遷移 $1S_0-3P_1$ を用いた磁気光学トラップの画像、
下はトラップ解放後 20m 秒後(落下距離 1.96mm)の拡散原子雲の
画像(温度 800nK, 原子数 1.9×10^7 個)。

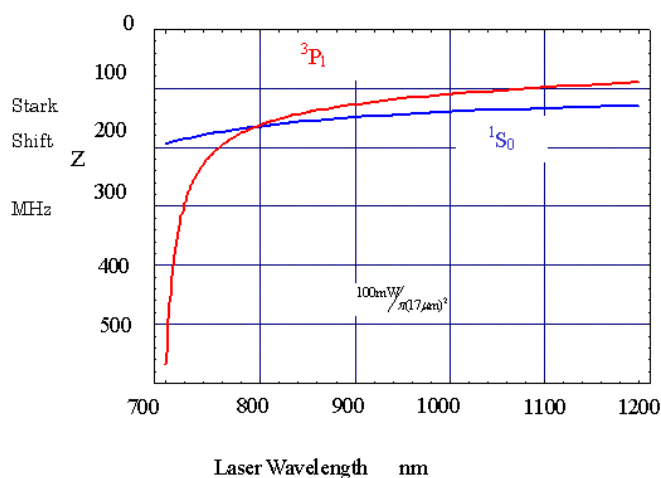


図 2 ストロンチウム原子 $1S_0-3P_1$ 準位の光シフトは 800nm 付近で一致する

成果展開可能なシーズ、用途等

- 1) 原子波干渉計, 光周波数標準

特許出願

なし

報告書他

- 1) Katori H., Ido H., Isoya Y., and Kuwata-Gonokami M., Magneto-optical trapping and cooling of strontium atoms down to the photon recoil temperature. *Phys. Rev. Lett.*, 82, 1116-1119 (1999)
- 2) Katori, H.; Ido, T.; Kuwata-Gonokami, M. Optimal design of dipole potentials for efficient loading of Sr atoms. *J. Phys. Soc. Jpn.* 68, 2479-2482 (1999).
- 3) Ido, T.; Isoya, Y.; Katori, H. Optical-dipole trapping of Sr atoms at a high phase-space density. *Phys. Rev. A.* 61, 061403 (2000).
- 4) Katori H., Ido T., Isoya Y., and Kuwata-Gonokami M., Laser Cooling of Strontium Atoms toward Quantum Degeneracy. CP551, Atomic Physics 17, edited by E. Arimondo, P. DeNatele, and M. Inguscio, American Institute of Physics, 382-396 (2001)

〔研究者名〕 香取 秀俊、井戸 哲也

1-2 ストロンチウム原子のフェルミ同位体に対する磁気光トラップ

フェルミ縮退に迫るレーザー冷却の実証。

研究成果の概略

磁気副準位の構造が異なるフェルミ同位体をサブマイクロケルビンに冷却・トラップする方法として、光ポンピング下での磁気光学トラップ法を開拓した。これによりストロンチウムのフェルミ同位体を反跳温度限界領域まで冷却できることを実証した。スピン禁制遷移 $^1S_0\text{-}^3P_1$ の上準位の超微細分裂準位において $F=9/2$ のゼーマン分裂係数が $F=11/2$ に比べて 5 倍程度小さいことを利用し、 $F=9/2$ への遷移に共鳴したレーザーによる光モラセスを利用することで、基底状態の磁気副準位の光ポンピングを行った。この方法により原子数 10^5 個、温度約 $1.0\mu\text{K}$ の ^{87}Sr のトラップに成功した。図 1 に示すように、 $F=9/2$ へのレーザーがあることで、 $F=11/2$ へのレーザーのみのトラップと比べて、原子数約 2 倍、トラップ寿命約 3 倍の増大が確認され、この DMOT スキームが有効であることが示された。また、続いて光双極子トラップへの原子の移行もボゾンと同様の方法で行い、移行した原子に対して偏極及び、さらなるレーザー冷却を施してフェルミ温度の 2 倍まで冷却・高密度化することに成功した。

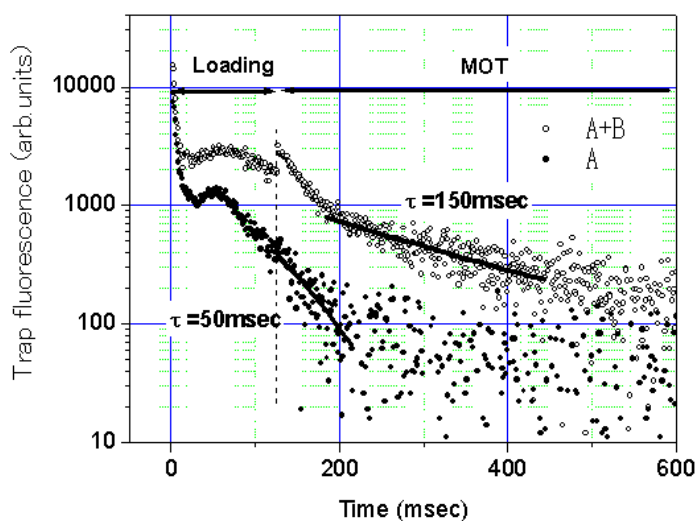


図 1 フェルミ同位体の磁気光学トラップでの個数と寿命
A : $F=11/2$ のレーザーのみ、
B : $F=9/2$ のレーザーと $F=11/2$ のレーザーの併用

成果展開可能なシーズ、用途等 1) 光周波数標準

特許出願 なし

報告書他

1) Mukaiyama, T 他 Dynamic magneto-optical cooling and trapping of ^{87}Sr near the Fermi temperature (投稿中)

〔研究者名〕 向山 敬、香取 秀俊

1-3 中性原子におけるサイドバンド冷却の開発

中性原子の一光子遷移でのサイドバンド冷却をはじめて実現した。

研究成果の概略

スピン禁制遷移の狭い準位幅と光シュタルクフリーな光双極子トラップの組み合わせにより、トラップ中の振動バンドを利用したサイドバンド冷却を行った。

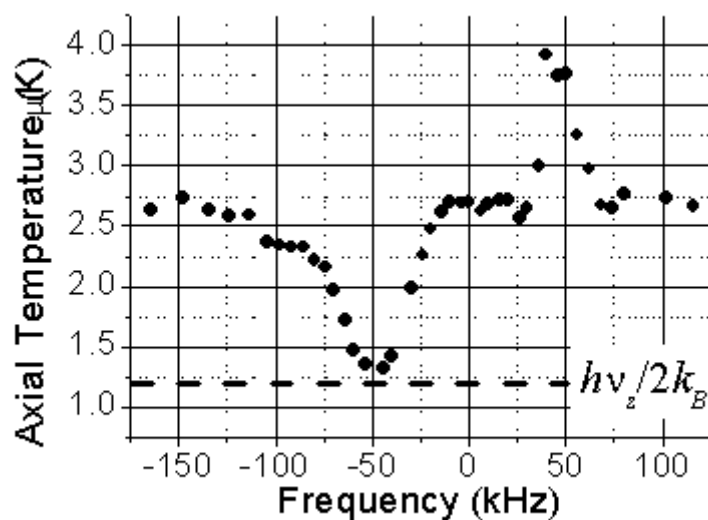


図1 サイドバンド冷却の効果振動周波数が約50kHzで、-1次のサイドバンドで冷却され+1次で加熱されている

成果展開可能なシーズ、用途等

- 1) 光周波数標準

特許出願

なし

報告書他

- 1) Ido, T 他 Sideband cooling of neutral strontium atoms (投稿予定)

〔研究者名〕 井戸 哲也、李 瑛、香取 秀俊

1-4 ラムディッケ領域にある中性原子のリコイルフリー分光

あらたな中性原子の無反跳分光手法の開発

研究成果の概略

光シュタルクシフトフリーな光双極子ポテンシャルを用いて原子を光学遷移の波長以下の狭い領域にトラップして並進運動の自由度を完全に凍結し(ラム・ディッケ領域)、ドップラー広がりも反跳シフトもない分光を行うことに成功し、kHz スケールの絶対周波数リファレンスを実現した。これはストロンチウムを用いた新しい周波数標準の可能性を示す成果である。光トラップの定在波としては波長 915nm、強度 350mW のビームを 1/e 直径 45mm に絞って用い、定在波の光軸方向に遷移の自然幅 7.1kHz より十分大きい 50kHz 程度の閉じ込め振動周波数を得ることができた。この定在波中の原子に飽和強度程度のプローブ光を定在波と同軸上に入射してその蛍光を観測し、図 1 に示すように飽和広がりのみで制限された 11kHz という狭線幅を得た。このスペクトルにおいては原子が同一温度 5 μ K で自由空間中にある場合に生じるドップラー広がり 70kHz を完全に抑制し、またその中心周波数は自由空間中原子の中心周波数よりも 5kHz 赤方にあり、Sr 原子がラム・ディッケ領域に閉じ込められてドップラーフリー分光が実現されていることを明瞭に示している。

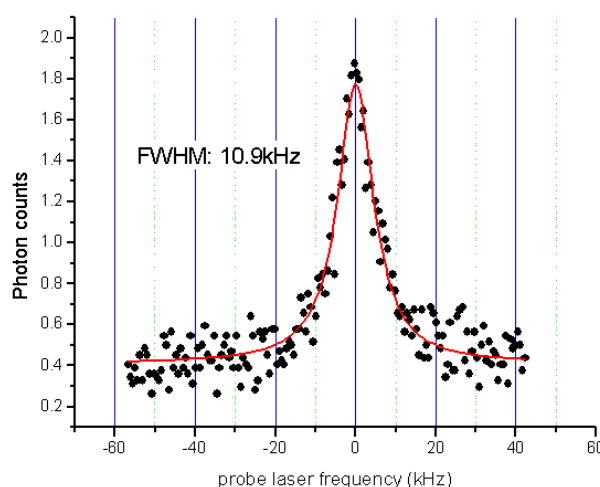


図 1 吸収蛍光の測定において 10.9kHz の半値幅で観測できた。時間標準や周波数標準への応用が期待される。

成果展開可能なシーズ、用途等 1) 周波数標準

特許出願 なし

報告書他

- 1) Hidetoshi Katori, Spectroscopy of strontium atoms in the Lamb-Dicke confinement, in the Proceedings of the 6th Symposium on Frequency Standards and Metrology, edited by Patric Gill, pp.323-330 (World Scientific Publishing Co., 2002).
- 2) Mukaiyama, T.; Katori, H.; Ido, T.; Li, Y.; Kuwata-Gonokami, M. Recoil-Limited laser Cooling of ^{87}Sr Atoms near the Fermi Temperature. Phys. Rev. Lett. 90, 113002 (2003).

〔研究者名〕 井戸 哲也、李 瑛、香取 秀俊

2. 電子正孔系の量子相関効果と非線形光学応答

2-1 励起子間相互作用と非線形光学応答の研究

電子と正孔がクーロン力で結合した励起子を複合ボゾンとして扱いそのボゾン間相互作用と非線形光学応答の関係を理論実験両面から明らかにした。

研究成果の概略

半導体に励起子準位に共鳴する光をあてると大きな非線形光学応答が生じることが知られていた。この効果の起源を解明するために、励起子を弱く相互作用するボゾンとして扱うモデルを提唱した。励起子間の相互作用を2つの励起子の偏光の組み合わせで分類しながら整理し、3次のコヒーレントな非線形光学応答係数をこの相互作用による非調和性を用いて表すモデルである。縮退4光波混合実験データからこの2体の相互作用の大きさと符号を直接決定できることを示し、実験結果はごく少数のパラメータで系統的に説明できることを見出した。このモデルの概略を図1に示す。より詳しい検討により、励起子間相互作用は励起子分子を形成する偏光の組み合わせに対して、相関関数が強いメモリー効果を示すことが明らかになった。図2は励起子分子の効果をメモリー関数として取り込むことを模式的に示したものである。

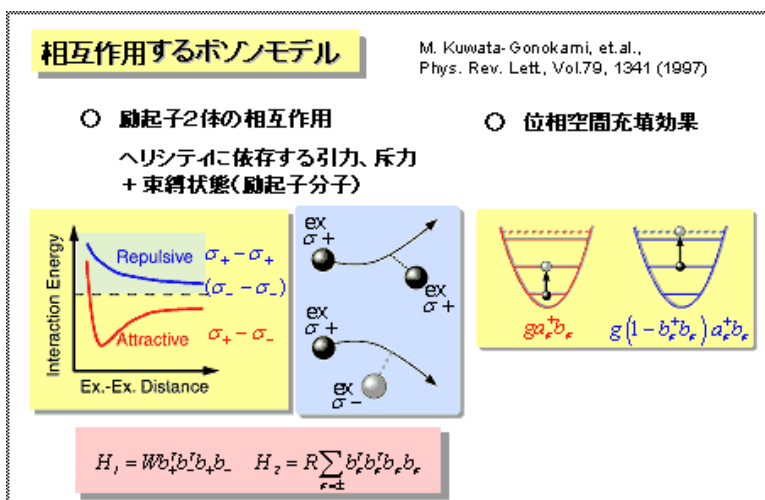


図1 励起子非線形応答の起源

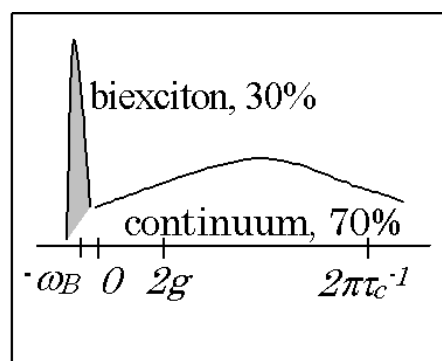


図2 GaAs 励起子非線形光学応答のメモリー関数 $G(\tau)$ の模式図

成果展開可能なシーズ、用途等

1) 励起子間相互作用を取り入れた半導体の非線形光学応答

特許出願

なし

報告書他

- 1) Shirane, M.; Ramkumar, C.; Svirko, Yu. P.; Suzuura, H.; Inouye, S.; Shimano, R.; Someya, T.; Sakaki, H.; Kuwata-Gonokami, M. Degenerate four-wave mixing measurements on an exciton-photon coupled system in a semiconductor microcavity. *Phys. Rev. B.* 58, 7978-7985 (1998).
- 2) Svirko, Yu. P.; Shirane, M.; Suzuura, H.; Kuwata-Gonokami, M. Four-wave mixing theory at the excitonic resonance: weakly interacting boson model. *J. Phys. Soc. Jpn.* 68, 674-682 (1999).
- 3) Svirko, Yu. P.; Kuwata-Gonokami, M. Signatures of the excitonic memory effects in four-wave mixing processes in cavity polaritons. *Phys. Rev. B.* 62, 6912-6915 (2000).

〔研究者名〕 Svirko, Yu、 Ramkumar, C、 五神 真

2-2 励起子非線形性の微視的理論

電子正孔状態を出発点と第一原理的計算法を開発し励起子非線形性の起源を解明した。

研究成果の概要

弱く相互作用するボソンモデルの微視的起源を明らかにするために、電子正孔状態を出発点とする微視的モデルに基づく第一原理的計算の方法を開拓した。励起子共鳴での非線形光学応答を励起子散乱として記述した。その結果、励起子間相互作用と電子正孔系の4体の量子相関の関係を明らかにし、実験を再現することができた。実験との比較において(図1)、2次元系のクーロン散乱問題の特徴である発散の問題を指摘し、第2ボルン近似の破綻を示し、散乱行列を数値対角化することで解決した。これは、励起子間相互作用をきちんと取り入れるためにはクーロン相互作用を無限次まで取り込むことが必要であることを示している。

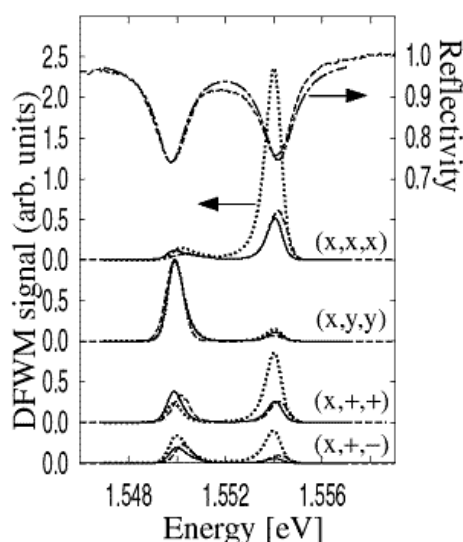


図1 反射スペクトルおよび偏光依存四光波混合スペクトルの実験結果と本研究の解析結果。
破線：実験結果、実線：解析結果、および点線：二次ボルン近似による解析結果

成果展開可能なシーズ、用途等

- 1) 励起子多体問題

特許出願

なし

報告書他

- 1) Kwong, N. H.; Binder, R. Phys. Rev. B 61,1 (2000). Binder, R.; Romyantsev, I. Kwong, N. H.; Takayama, R. Phys. Stat. Solidi. B 221,169-178 (2000).
- 2) Kwong, N. H.; Takayama, R.; Binder, R.; Romyantsev, I.; Kuwata-Gonokami, M. Phys. Rev. Lett. 87 027402 (2001)

- 3) Kwong, N. H.; Takayama, R. Romyantsev, I.; Kuwata-Gonokami, M.; Binder, R. Phys. Rev. B64 045316 (2001).
- 4) Donovan, M. E.; Schueulzgen ,A.; Lee, J.; Blanche, P.-A.; Romyantsev, I.; Kwong, N. H.; Takayama, R.; Yang, Z. S.; Peyghambarian, N.; Binder, R. Phys. Rev. Lett. 87, 237402 (2001).
- 5) Donovan, M. E.; Schueulzgen ,A.; Lee, J.; Blanche, P.-A.; Romyantsev, I.;Khitrova,G.; Gibbs, H. M.; Romyantsev, I.; Kwong, N. H.; Takayama, R.; Yang, Z. S.; Binder, R. Optics & Potonics News, December 2001
- 6) Takayama, R.; Kwong, N. H.; Romyantsev, I.; Kuwata-Gonokami, M.; Binder, R. T-matrix analysis of biexcitonic correlations in the nonlinear optical response of semiconductor quantum wells. European Phys. J. B., 25, 455-462 (2002).
- 7) Romyantsev, I.; Kwong, N. H.; Takayama, R.; Binder, R. submitted to Phys. Rev. B
- 8) Takayama, R.; Kwong, N. H.; Binder, R.; Romyantsev, I.; Kuwata-Gonokami, M. in preparation to submitted to JOSA B

〔研究者名〕 高山 立、Kwong, N. H.

2-3 極低温高密度電子正孔系の光による生成法と観測法の開拓

超短パルス光を用いて半導体中の電子正孔系を高密度かつ極低温の状態とする方法を探索した。さらに、生成した高密度電子正孔系の集団の状態やそのダイナミクスを調べる新しい方法として、電子正孔系のバンド内の集団運動を直接観測する中赤外領域のポンププローブ分光法を提案し手法を確立した。

研究成果の概要

高密度の光励起キャリアである電子正孔系を極低温とすると、キャリア間の強いクーロン相互作用と量子力学的な交換相互作用が拮抗して様々な量子状態が発現することが理論的に指摘されてきた。

しかし、通常半導体を強く光励起すると、キャリアは高温状態となり、冷却が進む前に再結合によって消失してしまう。そこで、極低温の電子正孔系を光で直接創り出す為に、フェムト秒パルス光をバンド端よりも低エネルギーの励起子準位に同調して励起する方法に着目した。励起子準位は励起密度によらずほぼ一定であることから、励起子を励起子が細密充填される密度（励起子モット転移密度）まで高密度に創ることが可能である。この密度を超えると励起子は自発的に乖離し電子正孔系が生じると考えられる。このときに生じる電子正孔系は熱エネルギーを持たない低温の状態になるはずである。このアイデアを実証するために、直接遷移型半導体（CuCl）の励起子準位を強く共鳴励起する実験を行った。

光励起キャリアの状態を観測する手法として、電子正孔対の内部遷移や集団運動を捉えることができる中赤外領域の電磁応答に着目した。そこで、強い励起子励起下で、中赤外領域のプローブ光の過渡反射スペクトルを調べるフェムト秒ポンププローブ分光法を確立した。CuCl 単結晶を用いて実験を行ったところ、励起直後に電子正孔のプラズマが発生したことを示す強い金属性の反射が観測されたが、これが10ピコ秒程度で分散型の応答に変化することを見出し下。このスペクトル変化を解析したところ、電子正孔系が空間的に凝縮して液滴を形成したものであることが明らかになった（図1）。これは従来の準熱平衡過程では実現不可能とされていた、直接遷移型半導体の電子正孔液滴の形成をはじめて示したものである。またワイドギャップの間接遷移型半導体であるダイヤモンドにおける電子正孔液滴の観測も行い、液滴の臨界温度が165 Kときわめて高温にあることを発見した（図2）。また直接遷移型半導体の中でも青色発光素子など応用上重要な GaN 系の物質のモット転移近傍のキャリアダイナミクスに着目し、過渡反射スペクトルから InGaN 混晶のようにポテンシャルの極小にキャリアが分布しているような系のダイナミクスの解明に有力な手法となりうる事を示した。

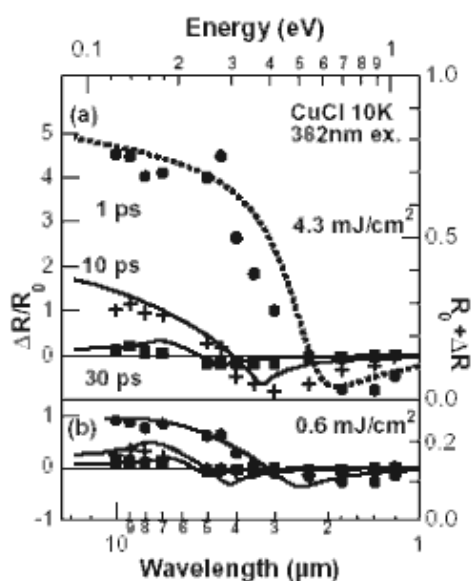


図 1 励起子共鳴 (382nm)における中赤外領域の過渡反射スペクトル (1,10,30ps)。励起光強度は(a) 4.3、(b)0.6 mJ/cm²。破線はキャリアが均一に分布していると仮定したときの反射スペクトルの計算、実線は部分的にイオン化していると仮定したときの反射スペクトルの計算。

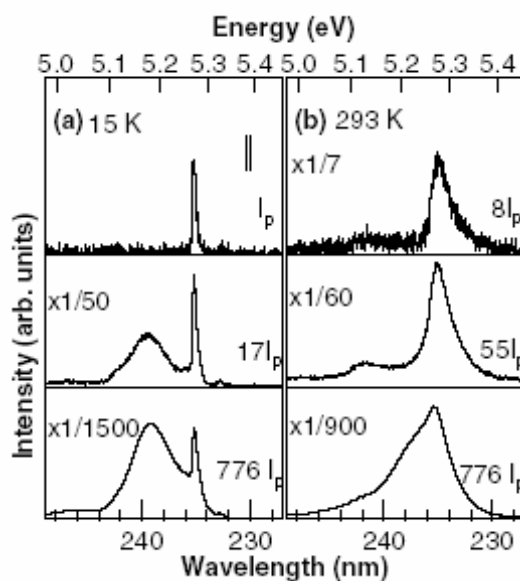


図 2 202nm 励起におけるダイヤモンドのバンド端近傍の発光スペクトル。温度は(a)15K と(b)293K である。励起密度は $I_p=0.03$ mJ/cm²。

成果の展開可能なシーズ、用途等

- 1) 紫外、青色半導体レーザー等

特許出願

件 名：半導体レーザー

出願番号：特願 2001-282324

出 願 人：科学技術振興事業団

請求の概要：レーザー媒質の光路に沿って不均一構造を導入したことを特徴とする。不均一構造は光パルスまたは機械的に導入した歪みまたは欠陥であることを特徴とする。

報告書他

- 1) Nagai, M.; Kuwata-Gonokami, M. Time-Resolved Reflection Spectroscopy of the Spatiotemporal Dynamics of Photo-Excited Carriers in Si and GaAs, J. Phys. Soc. Jpn., 71, 2276-2279 (2002).
- 2) Nagai, M.; Shimano, R.; Kuwata-Gonokami, M. Direct creation of electron-hole plasma by exciton Mott transition in CuCl, J. Lumin., 87-89, 192 (2000).

- 3) Nagai, M.; Kuwata-Gonokami, M. Degenerate electron-hole plasma formation via resonant exciton excitation in CuCl, *Phys. Stat. Sol. (b)*, 221, 261 (2000).
- 4) Nagai, M.; Shimano, R.; Kuwata-Gonokami, M. Electron-hole droplet formation in direct-gap semiconductors observed by mid-infrared pump-probe spectroscopy. *Phys. Rev. Lett.*, 86, 5795-5798 (2001).
- 5) Nagai, M.; Ohkawa K. and M. Kuwata-Gonokami, Midinfrared pump-probe reflection spectroscopy of the coupled phonon-plasmon mode in GaN, *Appl. Phys. Lett.* in press

〔研究者名〕 永井 正也、大川 和宏、五神 真

2-4 フェムト秒パルスによるボース縮退した励起子分子波の生成と干渉効果の観測

2光子遷移を利用して、レーザー光のボース縮重度を半導体の励起子分子に転写して、ボース縮重度の高いコヒーレントな励起子分子を生成できることを示した。

成果の概要

2光子遷移を用いると、励起パルスのボース縮重度を増倍して縮重度の高い励起子分子を作ることができることを提案した。この励起子分子波は非常にコヒーレンスのよい波として振る舞うことを独立に用意した2つの波の干渉実験から実証した。また縮重度の高い励起子分子波は光との相互作用において高効率なパラメトリック増幅効果を示すことを示し、強いスクイーズド光の発生に応用できることを提案した。

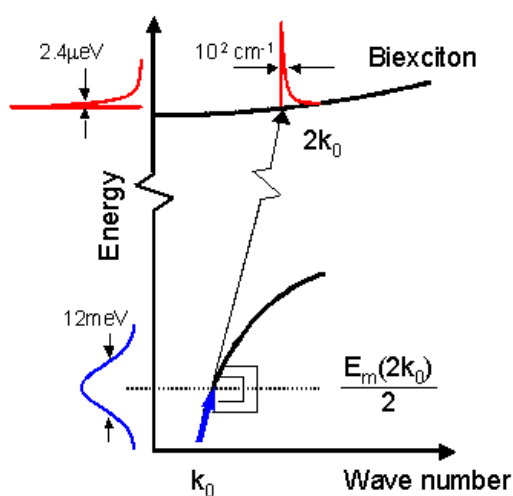


図1 励起子分子二光子励起による位相空間圧縮

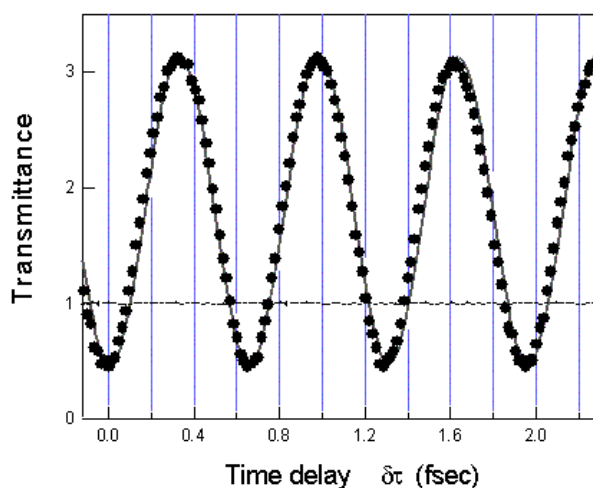


図2 コヒーレント励起子分子による光のパラメトリック増幅、減衰。
励起子分子波と光波との相対位相の関数として、透過率をプロットしたもの。

成果の展開可能なシーズ、用途等

- 1) スクイーズド光の発生

特許出願

なし

報告書他

- 1) Kuwata-Gonokami, M.; Shimano, R.; Mysyrowicz, A. Phase-Coherent manipulation on cold biexcitonic waves. J. Phys. Soc. Jpn., 71, 1257 (2002).

〔研究者名〕五神 真、Mysyrowicz, A.

2-5 Cu₂O 光学禁制パラ励起子の高感度観測法の開発

長年の懸案である亜酸化銅スピン三重項励起子（パラ励起子）のボース凝縮の問題の決着に向けて、オルソ、パラ両励起子の時空間ダイナミクスを分光学的に精度良く評価する方法として 中赤外過渡分光法を提案しその有用性を実証した。

研究成果の概要

Cu₂O 結晶の 1s パラ励起子はバンド間遷移がパリティ禁制かつスピン禁制であり、非常に長い寿命を持つ。パラ励起子のボース凝縮を示唆する実験がこれまで行われ、励起子ボース凝縮の有力候補として注目されてきた。しかし、パラ励起子は光学的な直接観測が困難なことからその物性は未知な部分が多く、ボース凝縮の議論に決着がつかない原因となっている。パラ励起子の 1s-2p 遷移は中赤外領域であるが、非常に吸収断面積が大きいことに着目し、1s パラ励起子の観測法として有効であることを見出した。その結果オルソ励起子とパラ励起子をスペクトル的に分離して観測することに成功した。(図 1)、(図 2)

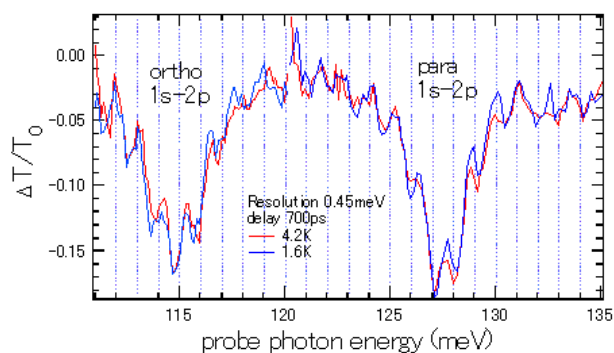


図1 格子温度 4.2K と 1.6K における励起後 700ps のオルソ励起子とパラ励起子の過渡吸収スペクトル。115meV 付近の吸収がオルソ励起子、127meV 付近の吸収がパラ励起子の信号である。試料表面での多重反射による干渉縞が現れている。

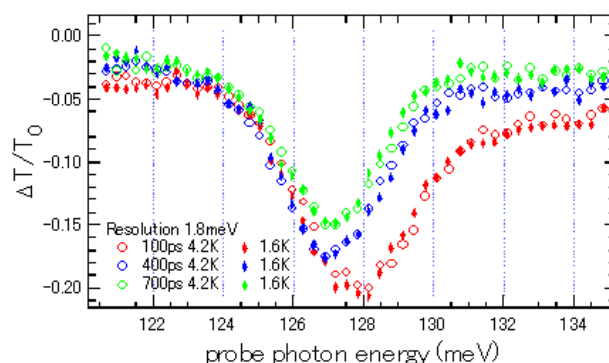


図2 格子温度 4.2K と 1.6K における励起後 100ps、400ps、700ps のパラ励起子の過渡吸収スペクトル。時間の経過と共にピーク位置が低エネルギー側に移動し、高エネルギー側の裾が狭くなっていくのがわかる。

成果の展開可能なシーズ等 1) 励起子 B E C

特許出願 なし

報告書他 なし

〔研究者名〕 五神 真

3. 強相関電子系の分光学と光制御機能の探索

3-1 一次元モット絶縁体 Sr_2CuO_3 における超高速光学非線形性の発見

一次元モット絶縁体 Sr_2CuO_3 が室温で大きな超高速非線形光学効果を示す事を発見した。

研究成果の概要

強相関電子系一次元モット絶縁体 Sr_2CuO_3 を取り上げ、近赤外域でポンププローブ分光を行ったところ、非常に大きな誘導吸収効果を観測した。2光子吸収分光法により、この大きな信号がバンド間2光子吸収によることを発見した。また、2光子吸収帯と線形吸収帯がほとんど縮退していること、ピークでの2光子吸収係数 β の値は従来のバンド絶縁体のものより桁程度大きいことがわかった。一光子許容状態と二光子許容状態の縮退はモット絶縁体の特徴であると考えられる。そこで、two-band Hubbard model を用いた数値計算を行い、この起源を明らかにした。その結果、大きな電子相関エネルギーが1及び2光子状態の縮退と強い光学非線形性の原因であることがわかった。さらに、同時に観測される減衰成分の時定数が 1ps 程度と非常に速いことを活かして、図1に示すような繰り返し Tbit/s 程度の光スイッチ動作のデモンストレーションを行った。実際の光スイッチを構成する上では非線形屈折率 n_2 の利用が望ましいので、 n_2 の評価も行った。図2に示す通り、その値が通信波長帯 $1.5\mu\text{m}$ 近傍で実際に大きいことを確認した。さらに非線形性が大きな物質を探索するため、Cu-O ネットワークが異なる物質、二重鎖一次元系 SrCuO_2 、二次元系 $\text{Sr}_2\text{CuO}_2\text{Cl}_2$ など調べ、図3に示すように一次元系の方が二次元系よりも非線形性が大きいこと、二次元系には数十 ps の遅い緩和成分が存在し光スイッチとしては不利であることを見出した。銅酸化物の非線形性及び緩和ダイナミクスの次元依存性を調べ、特性が Cu-O ネットワークの次元に支配されることを見いだした。これをクラスター計算と比較し、非線形性の次元依存性を定性的に説明することができた (図4、図5)。

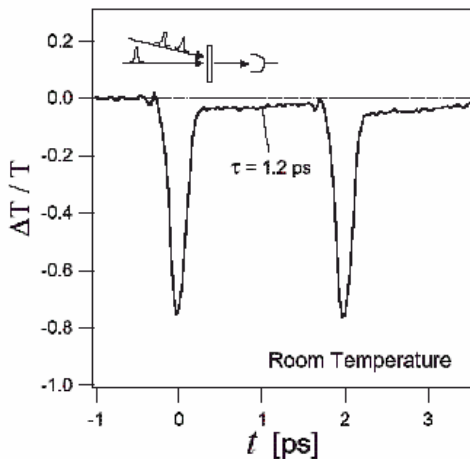


図1 Sr_2CuO_3 における光スイッチ動作デモンストレーション

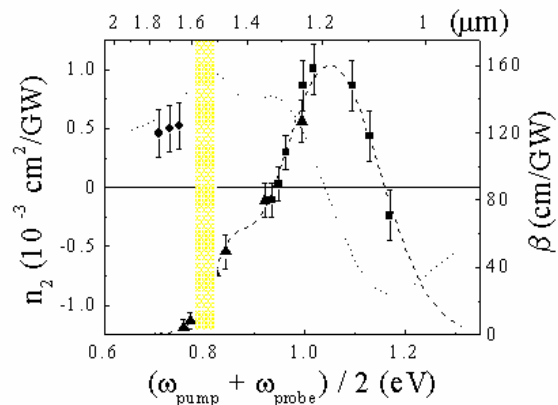


図2 Sr_2CuO_3 の n_2 と β のスペクトル

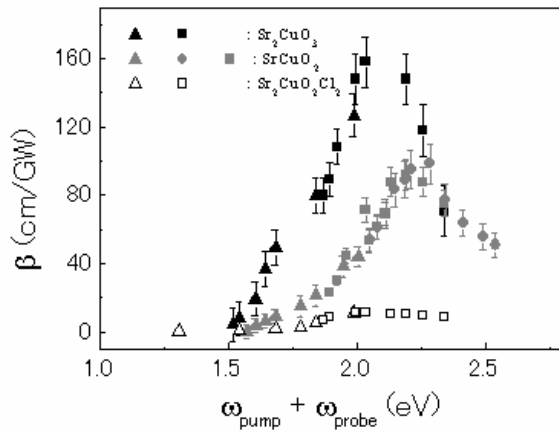


図3 二光子吸収スペクトルの物質依存性

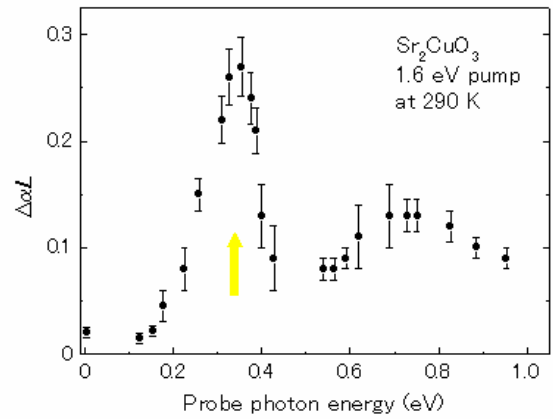


図4 Sr₂CuO₃の中赤外域過渡吸収スペクトル

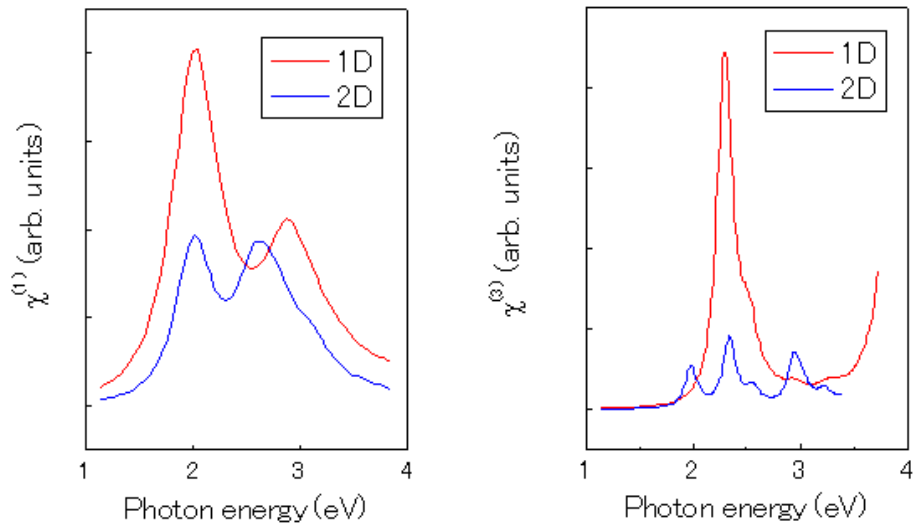


図5 ハミルトニアン(1)を用いて計算した線形光子吸収(左)と二光子吸収(右)スペクトル一次元系は赤線、二次元系は青線で示す。

成果の展開可能なシーズ、用途等

1) 全超高速光スイッチ等の次世代光通信素子

特許出願

件名：光-光スイッチと光通信装置と光スイッチ装置及び非線形光学材料

出願番号：特願 2000-065964

出願人：科学技術振興事業団

請求の概要： 低次元遷移金属酸化物である Sr₂CuO₃ を光-光スイッチに用いる。

件 名：波長変換素子及び波長変換装置

出願番号：特願 2001-328697

出 願 人：科学技術振興事業団

請求の概要：低次元遷移金属酸化物である Sr_2CuO_3 を波長変換素子に用いて、波長の制限を $1.55 \mu\text{m}$ 以上にする。

報告書他

- 1) Ogasawara, T.; Ashida, M.; Motoyama, N.; Eisaki, H.; Uchida, S.; Tokura, Y.; Ghosh, H.; Shukla, A.; Mazumdar, S.; Kuwata-Gonokami, M. Ultrafast optical nonlinearity in the quasi-one-dimensional Mott insulator Sr_2CuO_3 . *Phys. Rev. Lett.* 85, 2204 (2000).
- 2) Ashida, M.; Ogasawara, T.; Tokura, Y.; Uchida, S.; Mazumdar, S.; Kuwata-Gonokami, M. One-dimensional cuprate as a nonlinear optical material for ultrafast all-optical switching. *Appl. Phys. Lett.*, 78, 2831-2833 (2001).
- 3) Ashida, M.; Taguchi, Y.; Tokura, Y.; Clay, R.T.; Mazumdar, S.; Svirko, Yu. P.; Kuwata-Gonokami, M. Dimensionality dependence of optical nonlinearity and relaxation dynamics in cuprates. *Euro Phys. Lett.*, 58, 455 (2002).
- 4) 芦田昌明、五神 真 “低次元銅酸化物の超高速非線形光学応答-高温超伝導材料の関連物質による光スイッチの可能性-” *日本物理学会誌*, 2002, 57, 337-341.

〔研究者名〕 芦田 昌明、小笠原 剛、Clay R.T.、Svirko, Yu.P.

3-2 時間分解磁気光学分光の開拓と磁気緩和ダイナミクスの観測

ピコ秒の時間分解能をもつ時間分解磁気光学測定系を構築し、磁気相転移近傍の臨界磁気緩和ダイナミクスを捉えることに成功した。

研究成果の概要

時間分解磁気光学測定系を立ち上げ、超高速スピントロニクスへの展開、光による磁性制御といった応用も見据えてハーフメタル強磁性体 double-ordered Perovskite, $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_6$ の磁気カー効果の測定を行った。図 1 下段に磁化の応答に対応するカー楕円率角の時間変化を示す。上段には電子系の応答を反映する反射率の時間変化を示した。図 2 は磁化の緩和時間の温度依存性であり、磁気相転移の臨界温度に近づくにつれて緩和が遅くなるいわゆる critical slowing down が明瞭に観測された。さらに巨大磁気抵抗を示す $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ ($x=0.4$) を調べた結果が図 3 である。この系でもスピン系の応答が遅れていることがわかる。また、現在の半導体技術と相性が良く非常に注目されている希薄磁性半導体 $\text{GaAs:Mn}(6\%)$ を同じ手法で調べた。この物質はキャリア(正孔)誘起強磁性体として知られ、強磁性を示す半導体の中で最も高い強磁性転移温度を持つ。図 4 下段にカー回転角、楕円率の時間変化を示す。通常の半導体の正孔のスピン緩和は数ピコ秒の時間スケールで起きる事が知られており、磁化の緩和が電荷系と比較して遅れるという結果は極めて異常なことである。この物質は第一原理計算からハーフメタル的なバンド構造をもっていると推定されていたが、直接証拠は得られていなかった。この実験結果は GaAs:Mn がハーフメタル的であることを示唆するものと考えられる。また時間分解磁気光学分光がスピントロニクス応用状重要な磁性体のバンド構造に関する重要な知見を得る手段として有効であることを示している。

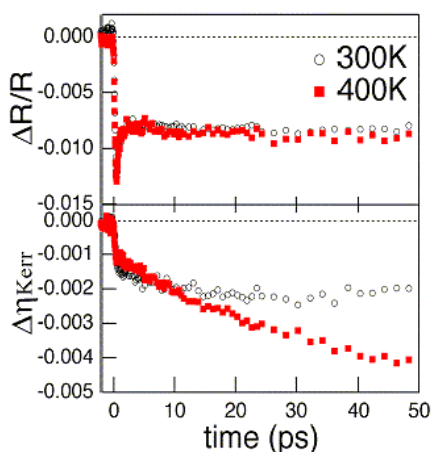


図 1 $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_6$ の反射率及びカー回転の時間変化。印加磁場は 0.2T

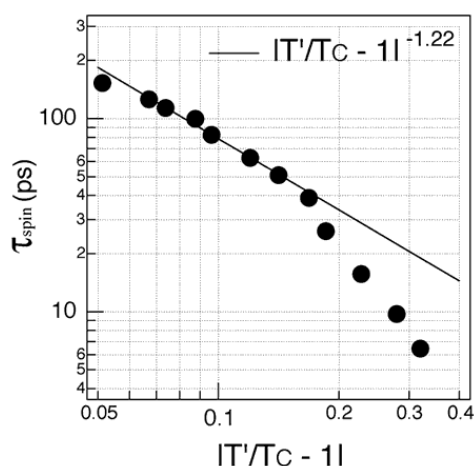


図 2 $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_6$ のスピン緩和時間の温度依存性。 T_c は臨界温度

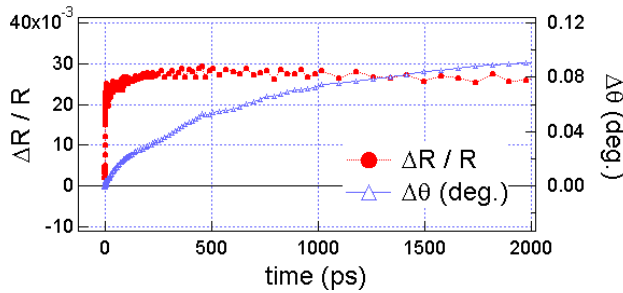


図 3 $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ ($x=0.4$) の反射率及びカー回転の時間変化。印加磁場は 0.2T

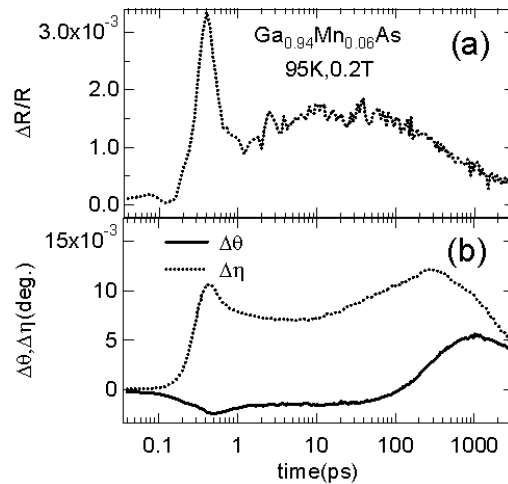


図 4 GaAs:Mn の反射率(a)及びカー回転(b)の時間変化 (横軸は対数表示) 楕円率 η と回転角 θ 両方の変化を示してある

研究成果の展開可能なシーズ、用途等

- 1) スピントロニクス素子

特許出願

なし

報告書他

- 1) Kise, T.; Ogasawara, T.; Ashida, M.; Tomioka, Y.; Tokura, Y.; Kuwata-Gonokami, M. Ultrafast spin dynamics and critical behavior in half-metallic ferromagnet: $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_6$. Phys. Rev. Lett. 85, 1986-1989 (2000).
- 2) 芦田昌明; 十倉好紀; 五神 真. 「強相関電子系の光励起状態における多体効果と協同-その超高速ダイナミクス」, 光で創る新物質相と相転移, 日本物理学会秋年次大会, 領域 5 シンポジウム, 徳島文理大, Sep. 2001.
- 3) Kojima, E.; et al., Signature of half-metallic spin polarization of ferromagnetic GaMnAs by time-resolved magneto-optical study (投稿予定)
- 4) Wu, M. W. Spin Dephasing induced by inhomogeneous broadening in D'yakonov-Perel' effect in a n-doped GaAs quantum well. J. Phys. Soc. Jpn., 70, 2195-2198 (2001).

〔研究者名〕 小嶋 映二、Wu, M. W.、小笠原 剛、芦田 昌明

3-3 テラヘルツパルスによる磁気光学分光法の開発

テラヘルツ電磁波パルスによる偏光解析法を開発し、磁気光学分光に応用した。

研究成果の概要

フェムト秒パルス光を用いて光整流によってテラヘルツ電磁波パルスを発生させ、それを用いたテラヘルツ領域の反射型偏光解析法を開発した。磁場中での斜入射反射係数の表式を導出し、テラヘルツパルスの時間波形から複素誘電応答関数の対角成分と非対角成分を精度よく評価する測定法と解析アルゴリズムを開発した。この手法を用いて n-InAs において 10 度以上の偏光回転を観測し、これが磁気プラズマ共鳴による巨大磁気光学効果によるものであることを見いだした (図 1、図 2)。

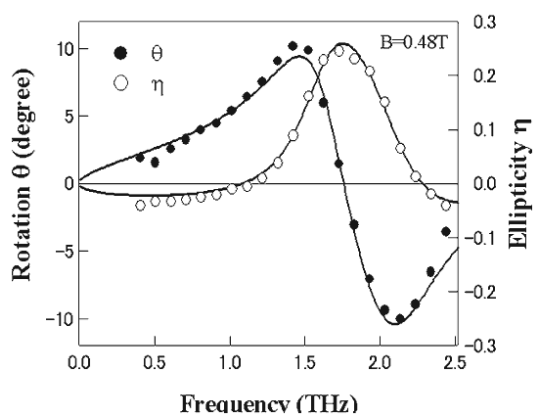


図 1 InAs の磁気光学カーブスペクトル

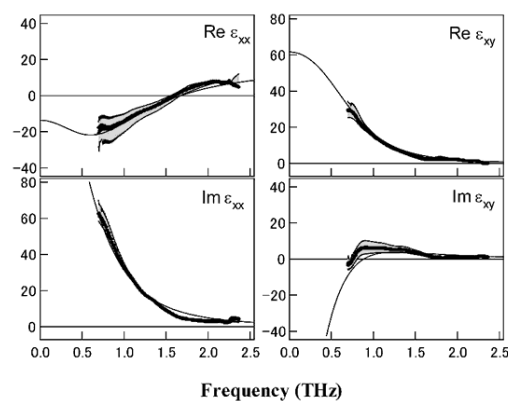


図 2 磁場 0.5T での InAs における誘電率テンソル

(太線：実験値、細線：ドールモデルによる理論値) 灰色部は実験誤差

成果の展開可能なシーズ、用途等

- 1) 赤外分光法、誘電率テンソルの決定

特許出願

なし

報告書他

- 1) Shimano. R.; Ino. Y.; Svirko. Yu. P.; Kuwata-Gonokami. M. THz frequency hall measurement by magneto-optical Kerr spectroscopy in InAs. Appl. Phys. Lett., in press

〔研究者名〕 Svirko. Yu. P

3-4 励起子クラスターモデルによる遷移金属酸化物の光学応答理論

遷移金属酸化物の非線形光学応答を説明するために励起子クラスターモデルを提案した。

研究成果の概要

遷移金属酸化物の光吸収スペクトルと 2 マグノンラマン散乱共鳴スペクトルでの問題を解決するため励起子クラスターモデルを提唱した。このモデルは 3d 電子の強相関効果と素励起の伝播効果を同じ土俵の上で記述できる点に特長がある。その結果、線形および非線形光学応答とそのスペクトルを定量的に記述する事に成功した。まず、4つの物質は最近接酸素イオンの 2p 軌道間の電荷移動行列 t_p と電子正孔間の引力 V と、さらには銅 (3d) 軌道とその最近接酸素 (2p) 軌道間の電荷移動行列 t_o とが相異なり、その事実が光スペクトルを決定している。さらにそれらの値の違いを与える物理的背景も理解できた。

成果の展開可能なシーズ、用途等

- 1) 遷移金属酸化物の光吸収スペクトル

特許出願

なし

報告書他

なし

〔研究者名〕 花村 榮一、Dan, N. T.

4. 微小光学素子の為の光波操作法の研究

4-1 結合微小球のフォトニック分子モード

直径数ミクロンの微小球の光閉じこめ効果を利用した微小空間での光波操作法を開拓した。

研究の概要

波長の数倍のサイズの誘電体微小球は、3次元的な光共振器として作用することが知られている。この光閉じこめモードの周波数は微小球のサイズに依存する。そこで、直径4ミクロンから5ミクロンの誘電体微小球のサイズを0.05%の精度で制御する技術を開拓し、サイズの制御された2つの微小球を連結させ、それぞれの閉じこめモードである、Whispering Gallery Mode を共鳴的に結合させることを試みた。蛍光色素をドーブしたポリマー微小球を連結させたところ、結合モードと反結合モードを明瞭に観測した。これはWGMを用いてTight binding 近似による微小領域での光波操作の可能性を拓くものである。この他にも微小球を用いた新機能素子を開発しつつある。

成果の展開可能なシーズ、用途等

- 1) 光通信用新機能素子

特許出願

なし

報告書他

- 1) T. Mukaiyama, K. Takeda, H. Miyazaki, Y. Jimba and M. Kuwata-Gonokami Tight-binding photonic molecule modes of resonant bispheres Phys. Rev. Lett. 82, 4623 (1999).

〔研究者名〕 向山 敬、成田 善廣、竹田 研爾