

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 4 月 1 日現在

機関番号：17401

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010～2012

課題番号：22540411

研究課題名（和文） パラメトリック増幅媒質中の超低速パルス伝搬

研究課題名（英文） Ultraslow pulse propagation in parametric amplifying media

研究代表者

光永 正治 (MITSUNAGA MASAHARU)

熊本大学・大学院自然科学研究科・教授

研究者番号：90332882

研究成果の概要（和文）：ラムダ型 3 準位系において、2 光子共鳴条件を満たすような 2 光波（カプリング光とプローブ光）パルスを入射し、さらに、強いカプリング光の下でプローブ光が増幅されるような条件で、パルス強度、パルス幅や遅れ時間といったパルス伝搬の挙動を理論的・実験的に解析し、人為的に制御可能なパルス伝搬を模索する。2 光波により誘起された超微細準位間のコヒーレンスの振る舞いを調べ、コヒーレンスの重要性を議論する。

研究成果の概要（英文）：In a three-level Lambda system, we apply two optical waves (coupling wave and probe wave) satisfying the two-photon resonance condition. We investigate the pulse propagation behaviors such as pulse height, pulse width and pulse delay time under parametric amplification conditions with a strong coupling power. We also investigate the importance of the sublevel coherence between the two hyperfine levels induced by the two optical waves.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	2,000,000	600,000	2,600,000
2011 年度	600,000	180,000	780,000
2012 年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	3,200,000	960,000	4,160,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・量子エレクトロニクス

キーワード：非線形光学、相関光子、電磁誘導透過、コヒーレンス、4 光波混合

### 1. 研究開始当初の背景

アルカリ金属を用いた冷却原子あるいは原子蒸気のラムダ型 3 準位系における量子干渉効果は、ここ数十年ホットな話題であり続けており、その量子計算、量子通信への応用はもちろん、パルス伝搬、スローライト、量子メモリー(L. V. Hau et al., *Nature* **397**, 594 (1999))、あるいは、コンパクトな実用型原子時計への応用まで、さまざまな分野で研究が進んでいる。我々も、ナトリウム蒸気を用い

た 2 光波と原子系の相互作用を色々な角度から研究しているが、特に、パラメトリック増幅(K. Harada et al., *Phys. Rev. Lett.* **A78**, 013809 (2008))媒質中におけるパルス伝搬、あるいは、カプリング光を介した 2 光波（プローブ光とストークス光）が互いに影響を及ぼし合って超低速で伝搬するマッチトパルス(matched pulses) (J. Okuma et al., *Opt. Lett.* **34**, 1654 (2009)) 等の研究により、理論的・実験的に、カプリング、プローブ、スト

ークス光の果たす役割等もかなり明らかになってきた。そこで、研究をさらに発展させ、メカニズムをシステマティックに解析することで、光パルスの伝搬を人為的に制御できるようにし、量子通信や光エレクトロニクスへの応用も飛躍的に発展するものと考えているようになってきた。

## 2. 研究の目的

強い共鳴ポンプ光（カプリング光）を照射したアルカリ金属原子における、弱い信号光（プローブ光）のパルス伝搬の挙動を解析する。特に、ラムダ型 3 準位系の 2 光子共鳴条件におけるパラメトリック過程に着目し、信号パルスとアイドラーパルス（ストークスパルス）が、増幅され、かつ超低速の伝搬を行う様子を理論的実験的に解析し、最終的には、任意の遅れ時間を持つ光遅延パルス発生器のプロトタイプを実現させる。理論的にも、リウヴィル方程式とマクスウェル方程式を連立させ、プローブパルスとストークスパルスのパルス伝搬の様子を解析的に調査する。また、3 準位系に特徴的な 2 光子コヒーレンス（ラムダ型の場合は超微細準位間のサブレベルコヒーレンス）の挙動に着目し、その重要性を様々な角度から解析し、検討する。

## 3. 研究の方法

我々の研究室は、長年にわたり、ナトリウム蒸気の非線形分光を行ってきている。実験的には、2 台の固体レーザー励起波長可変リング色素レーザーが稼働しており、ナトリウムの D1 線、D2 線に独立に共鳴させることも可能だし、また、さらに上の準位に励起する、ラダー型の実験系にも適している。また、超微細準位分裂周波数のサイドバンドを発生させる音響光学変調器も複数台、稼働している。さらに、種々の実験に対応できるように、単一モード光ファイバー、磁気シールド、原子蒸気の温度コントロール、ロックイン検出器やボックスカー積分器等もそろっており、所望の実験がある程度自由にできるような実験環境ができていると言える。

## 4. 研究成果

### 2010 年度の成果

強いポンプ光（カプリング光）のもとでの、プローブ光とストークス光の伝搬の様子を Maxwell-Liouville 方程式を解くことにより、理論的に調査した。パルス遅れには種々の種類があることがわかり、共通の遅れ (Common delay)、付加的な遅れ (additional delay)、初期の遅れ (initial delay) 等があることが明らかにされた。これらの理論的なシミュレーションは、実験によるプローブとストークスの伝搬の様子と比較され、良好な一致をみた。基本的には、プローブもストークスも、

ある程度共通に増幅され、共通な遅れ時間を持つという、マッチトパルスの状況が生まれる事がわかった。ただ、パラメーターの選比方次第では、ストークス光を先行させたり、プローブ光を先行させたりすることも可能である。全体のトータルな遅れは光深度 (Optical density)  $\alpha L$  によって決定され、プローブとストークスの相対的な遅れは、カプリングパラメーターにより決まる事がわかったので、これらを調整すれば、原理的には、任意の遅れ時間を持つプローブ光とストークス光が実現可能である。これらの結果は、”Arbitrary delay-time control of ultraslow matched pulses” と題して、J. Opt. Soc. Am. B27, 1280 (2010) に論文発表された。

### 2011 年度の成果

3 準位系と 2 光波の相互作用においては、2 光子コヒーレンスが重要な役割を果たす事が次第に明らかになり、それにより量子干渉効果が生まれるわけであるが、それをラムダ型ではない、他の系で実現することで、2 光子コヒーレンスへの理解をより深いものに行けると考え、ラダー型の 3 準位系での電磁誘導透過を含む量子干渉効果の観測と解析に時間を費やした。選んだ系は、ナトリウム原子の  $3S_{1/2}-3P_{1/2}, 3/2-4D_{5/2}, 3/2$  の 3 準位系、あるいは、 $3S_{1/2}-3P_{1/2}, 3/2-5S_{1/2}$  の 3 準位系で、上遷移に強いカプリング光を照射し、下遷移のプローブ光の透過スペクトルをモニターした。 $3S_{1/2}-3P_{1/2}, 3/2-4D_{5/2}, 3/2$  の場合、透過スペクトルは、通常観測される電磁誘導透過スペクトルとはかなり違ったスペクトル波形を示し、2 つの逆向きのローレンツ曲線が干渉したものと解釈することができる。これは、上向きのローレンツ曲線が電磁誘導透過を、下向きのローレンツ曲線が 2 段階励起を表すと解釈することで、うまく説明することができ、実際に理論的予測もそのようになっている。また、カプリング光の強度依存性や離調依存性、プローブ光の強度依存性等も、やはり上記の解釈をサポートするような形になった。 $3S_{1/2}-3P_{1/2}, 3/2-5S_{1/2}$  も似たようなスペクトルを得る事ができたが、解釈はもう少し複雑になる。これらの結果は、”Interference between electromagnetically induced transparency and two-step excitation in three-level ladder systems” というタイトルで、J. Opt. Soc. Am. B27, 1645 (2010) に発表された。

一方、ラムダ型 3 準位系に関しては、カプリング光の強度や原子密度に対し、系が電磁誘導透過 (EIT) 的な振る舞いをするのか、パラメトリック増幅 (PA) 的な振る舞いをするのか、正確に理解したとは言いがたい状況であった。このため、我々は基本に戻って、ナト

リウム D1 線の 4 準位系 (3S<sub>1/2</sub>, 3S<sub>3/2</sub>, 3P<sub>1/2</sub>, 3P<sub>3/2</sub>) において正確にリウヴィル方程式を解き、マクスウェル方程式と連立させることで、すべてのパラメーターで実験結果を再現するような理論を構築した。もちろん、実際のスペクトルを再現するように、飽和吸収信号も振る舞いも理論に含まれている。この結果、カプリング光が弱く、原子密度の低い EIT 領域から中間領域を経て、カプリング光が強くなり、原子密度の高い PA 領域まで、すべての領域で理論と実験を一致させることができた。さらにさまざまな付加的な現象も予測することができるようになった。これらの結果は、” Coherent pump-probe spectroscopy in sodium vapor: From electromagnetically induced transparency to parametric amplification ” と題して、Phys. Rev. A83, 063824 (2011) に論文発表された。

#### 2012 年度の成果

2011 年度に行ったラダー型 EIT の系をさらに発展させ、電磁誘導偏光回転の系を立ち上げた。これは、上遷移に共鳴したカプリング光を制御することで、下遷移に共鳴したプローブ光の偏光を回転させようとするもので、例えば光スイッチ等への応用が考えられる。偏光回転角度として最大 18 度が得られ、また、100ns 以下の応答を示す事も実験的に明らかになった。これらの成果は、” Electromagnetically induced polarization rotation in Na vapor ” と題して、J. Opt. Soc. Am. B29, 1717 (2012) に発表された。

最後に、ラムダ型 3 準位系の量子干渉効果において最も重要な物理量であるサブレベルコヒーレンスの、時間的な挙動を明らかにするため、通常の EIT の実験において、カプリング光とプローブ光をパルスにすることにより生じる、ラマンラムゼーフリンジ (FFR) の観測を行った。これは、パルス化された励起光のパルスの立ち上がり部分にのみボックスカーでゲートをかけ、透過光強度を観測することで FFR スペクトルを観測する手法である。このように得られた FFR スペクトルは、EIT スペクトルよりはるかに優れた特徴を持つ。まず、EIT の場合、ピーク的位置は ac シュタルク効果により励起光強度に依存してシフトするが、RRF の場合、ピークシフトはほとんど無視できる。また、EIT の場合、信号の線幅も飽和広がりによりひろがっていくが、RRF の線幅は、パルス間隔 T のみに依存し、T を大きくすれば、任意に狭い信号が得られる。このように RRF はサブレベルコヒーレンスを純粋に観測する上で極めて優れた手法であることがわかった。また、簡単な理論においてもそれが確かめられた。これらの結果は、つい最近、” Line-shape comparison of electromagnetically induced

transparency and Raman Ramsey fringes in sodium vapor ” と題して、Phys. Rev. A87, 023836 (2013) に発表された。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 5 件)

1. I. Yoshida, N. Hayashi, K. Fujita, S. Taniguchi, Y. Hoshina, and M. Mitsunaga, “Line-shape comparison of electromagnetically induced transparency and Raman Ramsey fringes in sodium vapor”, Phys. Rev. **A87**, 023836 (2013). 査読有
2. N. Hombo, S. Taniguchi, S. Sugimura, K. Fujita, and M. Mitsunaga, “Electromagnetically induced polarization rotation in Na vapor”, J. Opt. Soc. Am. **B29**, 1717 (2012). 査読有
3. K. Takahashi, N. Hayashi, H. Kido, S. Sugimura, N. Hombo, and M. Mitsunaga, “Coherent pump-probe spectroscopy in sodium vapor: From electromagnetically induced transparency to parametric amplification”, Phys. Rev. **A83**, 063824 (2011). 査読有
4. N. Hayashi, A. Fujisawa, H. Kido, K. Takahashi, and M. Mitsunaga, “Interference between electromagnetically induced transparency and two-step excitation in three-level ladder systems”, J. Opt. Soc. Am. **B27**, 1645 (2010). 査読有
5. A. Fujisawa, N. Hayashi, K. Takahashi, H. Kido, and M. Mitsunaga, “Arbitrary delay-time control of ultraslow matched pulses”, J. Opt. Soc. Am. **B27**, 1280 (2010). 査読有

[学会発表] (計 12 件)

1. 林暢仁、吉田一路、藤田和希、谷口秀也、保科圭孝、光永正治、「EIT 及びラムゼーフリンジにおける ac Stark シフト」日本物理学会、2013. 3. 29、29pEG-6、広島大学 (広島)
2. 保科圭孝、谷口秀也、林暢仁、藤田和希、吉田一路、光永正治、「V 型 3 準位系における量子干渉効果」日本物理学会、2013. 3. 29、29pEG-5、広島大学 (広島)
3. I. Yoshida, N. Hayashi, K. Fujita, S. Taniguchi, Y. Hoshina, and M. Mitsunaga, “Observation of Raman Ramsey fringes in Na vapor” International Symposium on Advanced Materials Having Multi-Degrees-of-Freedom (ISAMMDoF) at Kumamoto, kumamoto university, 2012.11.1,

- Japan, P-6 (2012).
4. 吉田一路、藤田和希、谷口秀也、保科圭孝、光永正治、「ナトリウム蒸気を用いたラムダ型 3 準位系におけるラムゼーブリンジの観測」 日本物理学会、2012. 9. 20、20aAJ-11、横浜国立大学（神奈川県）
  5. Y. Hoshina, S. Taniguchi, K. Fujita, I. Yoshida, and M. Mitsunaga, “Electromagnetically induced polarization rotation in Na ladder systems” International Conference on Atomic Physics (ICAP) at Palaiseau, 2012.7.24, Palaiseau, France, Tu-040 (2012).
  6. K. Fujita, S. Taniguchi, I. Yoshida, Y. Hoshina, and M. Mitsunaga, “Optically detected magnetic resonance using elliptical polarization” International Conference on Atomic Physics (ICAP) at Palaiseau, 2012.7.24, Palaiseau, France, Tu-038 (2012).
  7. 谷口秀也, 本坊尚也, 梶村祥太, 藤田和希, 光永正治、「ラダー型 3 準位系における光誘起偏光回転の測定」 日本物理学会、2012. 3. 26、26pBE-14、関西学院大学（兵庫）
  8. 保科圭孝, 北祐介, 吉田一路, 谷口秀也, 藤田和希, 光永正治、「光検出磁気共鳴を用いた核ゼーマン分裂の観測」 第 22 回光物性研究会、2011. 12. 9、II B-59、熊本大学（熊本）
  9. 本坊尚也, 谷口秀也, 光永正治、「量子干渉効果による光誘起偏光回転」 第 22 回光物性研究会、2011. 12. 9、I B-35、熊本大学（熊本）
  10. 梶村祥太, 藤田和希, 光永正治、「ナトリウム蒸気におけるコヒーレントポンププローブ分光」 第 22 回光物性研究会、2011. 12. 9、I A-7、熊本大学（熊本）
  11. 藤田和希, 谷口秀也, 梶村祥太, 本坊尚也, 光永正治、「光 RF2 重共鳴による核ゼーマン分裂の観測」 日本物理学会、2011. 9. 22、22pEB-10、富山大学（富山）
  12. S. Sugimura, K. Takahashi, N. Hayashi, N. Hombo, S. Taniguchi, K. Fujita, and M. Mitsunaga, “Transition from EIT to parametric amplification” ICAST at Jinan, China, 2011.9.24, 9-2-o (2011).

[その他]

ホームページ等

<http://crocus.sci.kumamoto-u.ac.jp/physics/quopto/index.html>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

光永 正治 (MITSUNAGA MASA HARU)  
熊本大学・大学院自然科学研究科・教授  
研究者番号：90332882