量子干渉効果による光誘起偏光回転

本坊尚也、谷口秀也、光永正治

熊本大学自然科学研究科 В

Optically-induced Polarization Rotation by Quantum Interference Effect

N. Hombo, S. Taniguchi, M. Mitsunaga

Graduate School of Science and Technology, Kumamoto University

We investigate optically-induced polarization rotation (OIPR) based on a quantum interference effect in a three-level ladder system. When the two-photon resonance condition is fulfilled, the polarization angle of a weak probe beam resonant to a lower ladder transition is considerably rotated by up to about 9 degrees in the presence of a circularly-polarized strong coupling beam resonant to an upper ladder transition. Experiments were performed using the $3S_{1/2} - 3P_{1/2} - 4D_{3/2}$ ladder system of a sodium atom. Unique OIPR spectra characterized by double-dispersion curves can be explained in terms of interference between electromagnetically-induced transparency (EIT) and two-photon absorption (TPA). A theoretical simulation based on perturbation calculation is also presented.

1. はじめに

我々は、ナトリウム原子を用いたラダー型 3準位系における実験で、弱い probe 光と 強い coupling 光が 2 光子共鳴条件($\omega_p + \omega_c = \omega_{31}$:ここで、 ω_p はプローブ周波 数、 ω_c はカプリング周波数、 ω_{31} はラダー の最上準位と最下準位の周波数差)を満た す際に、2 光子吸収(Two-Photon Absorption : TPA)と電磁誘導透過 (Electromagnetically Induced Transparency : EIT)が同時に起こるとい う現象を観測した[1]。さらに、カプリング光 を円偏光とし、プローブ光を直線偏光とする とき、2 光子共鳴条件下では、プローブ光の 偏光が大きく回転する事を見出した。これは、 カプリング光により、プローブ光の σ₊ 成分と σ_ 成分の間の屈折率の対称性が崩れる事 に起因するものである[2,3]。

今回この偏光回転を利用し、量子情報処 理分野へのデバイスとしての応用を考える べく、より回転角度を拡大できるよう研究を 行った。その結果、過去の研究に比べ2倍 近い偏光回転を得ることができたので報告 する。

2. 光誘起偏光回転の原理

セルに入射前の probe 光(直線偏光)は σ_+ 偏光と σ_- 偏光の重ね合わせとして、

$$\vec{e}_{in} = \vec{e}_x = \frac{1}{\sqrt{2}} \left(\vec{e}_+ + \vec{e}_- \right)$$

と表現できる。セルを通過後、それぞれの 偏光成分は位相変化をうけ、

$$\vec{e}_{out} = \frac{1}{\sqrt{2}} \left(\vec{e}_{+} \mathrm{e}^{-\alpha_{+}L + in_{+}k_{p}L} + \vec{e}_{-} \mathrm{e}^{-\alpha_{-}L + in_{-}k_{p}L} \right)$$

となる。ここで、 α_{\pm} 、 n_{\pm} はそれぞれ、 σ_{\pm} 偏 光に関する吸収係数と屈折率を表し、Lは 試料長である。この位相変化の大きさより、 偏光の回転角度 θ は感受率 χ を用いて、

$$\theta = \frac{k_p L}{2} (n_+ - n_-)$$
$$= \frac{k_p L}{4} (\Re[\chi_+] - \Re[\chi_-])$$

と求めることができる。

今回用いたナトリウムのエネルギー準位 は、3S_{1/2}-3P_{1/2}-4D_{3/2}ラダー遷移で、図 1 に 示される。



図 1 ラダー型 3 準位系

ここで、 δ_p 、 δ_c はそれぞれ、プローブ、カプ リング光の離調周波数である。プローブ光 の吸収、あるいは屈折率は、密度行列の 12 成分、 ρ_{12} により求められ、摂動展開を用い ると、

$$\rho_{12} = -\frac{i}{2} \frac{\Omega_p}{\gamma_{12}'} + \frac{i}{8} \frac{\left|\Omega_p\right|^2 \Omega_p}{\gamma_{12}'^2 \gamma_{13}'} - \frac{i}{8} \frac{\left|\Omega_p\right|^2 \left|\Omega_c\right|^2 \Omega_p}{\Gamma_2^2 \gamma_{12} \gamma_{23} \gamma_{12}'} L_p L_q$$

となる。この式の第1項は線形吸収、第2項 は EIT、第3項は TPA を表している。実際に この式から感受率 χ_{\pm} を求め、 θ をプローブ 離調 δ_p の関数としてプロットすると、以下の 曲線が得られる。



図 2 プローブ離調の関数としての回転角 度のシミュレーション

計算の際には、実際の遷移における Clebsch-Gordan係数に基づく遷移強度を考 慮した。図2に見られるように、共鳴付近で は、TPAに基づくブロードな構造と、EITに基 づくシャープな構造の重ね合わせとして、信 号が解釈できる事がわかる。

3. 実験装置

今回の OIPR の実験装置を図 3 に示す。 probe 光 coupling 光ともに単一周波数リン グ色素レーザー(RDL)を使用している。 probe 光はナトリウムの D1 線(波長 589.6nm)を中心に掃引し、シングルモード フィルタで横モードを整えた後、PBS を通し て水平偏光にして、セルに入射している。 coupling 光は $3P_{1/2}-4D_{3/2}$ 遷移(波長 568.3nm)に共鳴する周波数に固定し、ス ペイシャルフィルタで横モードを整えた後、 四半波長板で σ_+ 偏光に変え、三角プリズ ムによってセル内で probe 光と重なるよう入 射している。



図3 実験装置の概略

probe 光は 0.1mW 程度、coupling 光は最 高 200mW 程のパワーを用いた。coupling 光を probe 光に対向にして重ねているのは、 2 光子共鳴条件がドップラーフリーになるた めである。

4. 偏光の観測

プローブ光の偏光の回転角度を実験で求 めるには、以下の手法を用いた。その観測 系は図4の通りである。



図4 偏光の回転角測定のための検出系

図 4 において、セルを通過してきた probe 光 を NPBS(Non-Polarizing Beam Splitter)を用 いて 2 つに分け、A の光は PBS でそれぞれ の 偏 光 成 分 に 分 けられ、I₁、I₂ として BPD(Balanced Photo-Detector)で検出する。 一方、B の光は 22.5°に固定した半波長板 を通した後、PBS を用い I₃、I₄として BPD で 検出する。この場合のI₁、I₂、I₃、I₄の値は、以 下のように表される。

$$\theta = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{I_3 - I_4}{I_1 - I_2} \right)$$

となり、I₁、I₂、I₃、I₄の相対強度測定によりθ を算出することが可能となった[4]。

5. 実験結果

probe 光の D1 線と共鳴付近での透過ス ペクトルは図 5 で与えられる。中心付近で、 TPA による吸収と EIT による透過が同時に 起こっている事がわかる。この部分での OIPR 信号スペクトルが図 6 である。外側の 大きな dip と peak が TPA に起因し、内側 の小さな peak と dip が EIT に起因するも のと考えられる。



図 5 カプリング光存在下での透過プローブ 光スペクトル



図 6 プローブ離調周波数の関数としての OIPR 信号スペクトル

これらの peak や dip をそれぞれ TPA-peak, EIT-peak と名付けて、 coupling 光の強度依存性について調べた ものが図7である。coupling 光の強度が上 がるにつれ EIT と TPA それぞれの偏光回 転角度が大きくなっていることが分かる。



図 7 回転角 *θ* のカプリング光パワー(mW) 依存性

また、coupling 光強度の低い領域では EIT による偏光回転が消え、TPA よる偏光回転 だけが残っている。これは coupling の強度 が下がるにつれ、TPA と EIT の peak や dip が重なり始め、100mW 辺りから EIT に よる偏光回転が TPA の偏光回転によって 完全に打ち消されてしまったためと考えられ る。

参考文献

[1] N. Hayashi *et al.*, J. Opt. Soc. Am. **B27**, 1645 (2010).

[2] R. Drampyan *et al.*, Phys. Rev. A80, 033815 (2009).

[3] K. Pandey *et al.*, J. Phys. **B41**, 225503 (2008).

[4] S. Li *et al.*, Phys. Rev. A74, 033821(2006).