

^{87}Rb 原子の D_1 遷移を用いた光の減速に関する研究

岸本研究室 1910216 桐村達也

1. 研究の背景と目的

光は真空中では一定の速度で伝わる。それに対して、屈折率 n の媒質中での光速 c_n は $c_n = \frac{c}{n}$ と表されることから、屈折率が大きければ大きいほど光は減速する。光を著しく減速させることが出来ると、媒質中に光を閉じ込めることも可能となる。これにより、光メモリーといった、光の持つ量子性を保持したまま光を蓄積できるデバイスの応用化が期待できる。しかし、一般には、高い屈折率といわれている媒質でも一桁程度であるので、光速度はせいぜい数分の一程度にしかならない。そこで、本研究では ^{87}Rb 原子の D_1 遷移(図1)を用いて、電磁誘起透明化(EIT)という飛躍的に光の減速を可能にする現象により光を減速させ、より高い減速効率の実現を目指す。また、異なる遷移を用いた時の見通しを探索することを本研究の将来的な目的とするが[1][2]、今回の研究では、まず先行研究を参考にしつつ、既知の遷移を用いた光の減速の実現を目指すこととした。

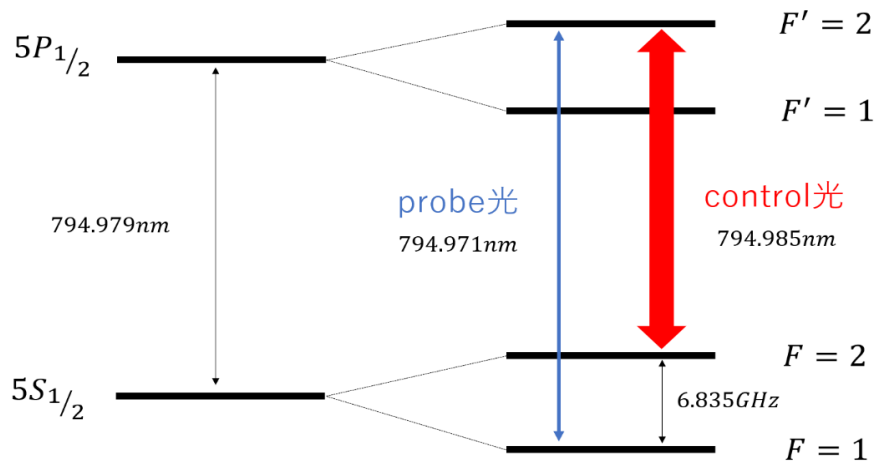


図1 ^{87}Rb 原子の D_1 遷移

2. 電磁誘起透明化(EIT)の原理

電磁誘起透明化(EIT)は、3準位系において準位 $|g_1\rangle \rightarrow |e\rangle$ 間、および準位 $|g_2\rangle \rightarrow |e\rangle$ 間にそれぞれ共鳴する、コヒーレントな2つの光を同時に照射することで起こる、特異な量子干渉現象のことである。準位 $|g_1\rangle \rightarrow |e\rangle$ 間に共鳴する、非常に弱い光をprobe光、準位 $|g_2\rangle \rightarrow |e\rangle$ 間に共鳴する、強い光をcontrol光とする。この2つの光を作用させると、下2つの準位に存在する原子が $|e\rangle$ に励起され、下2準位の量子状態が混ざり合った新たな準位 A、B

が形成され、準位 A,B にそれぞれ自然放出する。新しくできた準位の一方 A は、光を吸収し、 $|e\rangle$ へ励起可能な準位、そして、もう一方の B は、光を吸収せず、 $|e\rangle$ に励起されない準位である。光を照射し続けると、準位 A に吸収された原子は再び $|e\rangle$ 励起され、同様に準位 A、B にそれぞれ自然放出する。この過程を繰り返すことですべての原子が準位 B に自然放出し、物質は光を吸収しなくなり透明化される。このような状態を暗状態と呼ぶ。暗状態における系全体の波動関数 $|\psi_0\rangle$ は、 Ω_p, Ω_c をそれぞれ probe 光, control 光のラビ周波数として、

$$|\psi_0\rangle = \frac{1}{\sqrt{\Omega_p^2 + \Omega_c^2}} (\Omega_c |g_1\rangle - \Omega_p |g_2\rangle)$$

と表される[1]。 $|\psi_0\rangle$ の式には準位 $|e\rangle$ が存在しないので、吸収や発光などの電磁場との相互作用をしない状態となる。励起準位の分布数が 0、つまりこの状態に入り込んだ原子は光を吸収することはなく、自然放出を起こさないことが分かる。

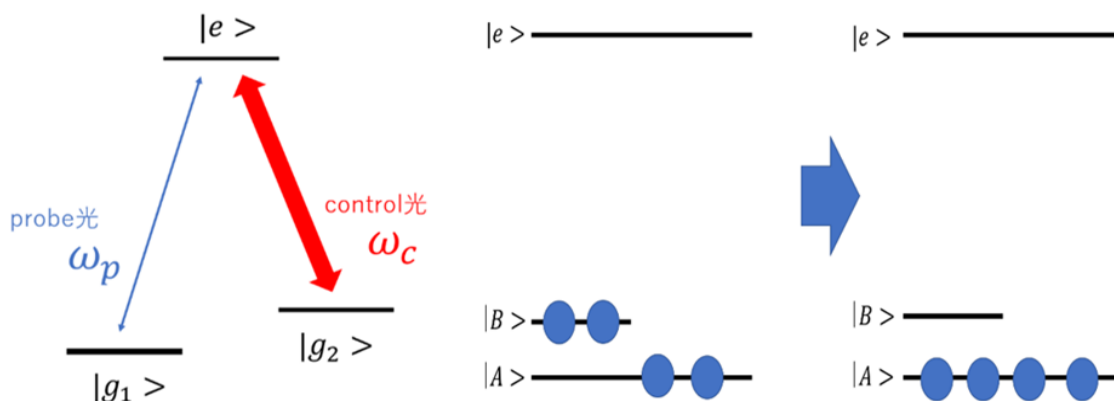


図2 EITの原理

EIT が生じている周波数領域では、屈折率が光の周波数変化に対して急激に変化する。光の群速度 v_g は、

$$v_g = \frac{c}{n + \omega_p \frac{dn}{d\omega_p}} \cong \frac{\hbar c \epsilon_0 |\Omega_c|^2}{2 \omega_p |\mu|^2 N}$$

と表される[1]。ここで、 μ は $|g_1\rangle - |e\rangle$ 間の双極子モーメント、 N は原子密度である。この式から、分散の項 $\omega_p \frac{dn}{d\omega_p}$ が大きいと群速度が遅くなることがわかる。これにより、光の群速度を飛躍的に減速させることが可能になる。EIT が起こった場合では、本来、共鳴周波数付近で吸収係数がピークの値をとるはずの所で、吸収が限りなく 0 に近づく状態とな

る。この領域は透過の窓と呼ばれ、この付近での吸収スペクトルの傾きが大きいほど巨大な分散が生じる。すなわち群速度が著しく遅くなる。また、control 光の強度を変えることで群速度を調整することができる。このように EIT では、吸収係数や屈折率など、光学的特性を大きく変化させることができるのが特徴である。

3. 光学系の概要

本研究では、probe 光をパルスとして用いた場合での光の減速を目指す[3][4]。光源の波長を遷移波長である 795nm に安定化させるために、電気光学変調器(EOM)と周波数安定化装置で構成されるレーザー制御系へつなぐ。出射光を偏光ビームスプリッタ(PBS)で control 光(赤実線)、probe 光(青実線)に分離する。probe 光を 6.755GHz の周波数を入れた EOM に通し、その後、80MHz アップシフトさせた音響光学変調器(AOM)に通すことにより、F=1,2 間の離調である 6.835GHz 分 upshift させる。AOM はシャッターとして用い、出射された 1 次回折光の一方を PD1 に入射させる。1 次回折光のもう一方を control 光と共に、磁気シールドで覆われたバッファガス入り⁸⁷Rb蒸気セルに通す。⁸⁷Rb蒸気セルを通過した probe 光を PD2 に入射させることで光の減速を観測する。

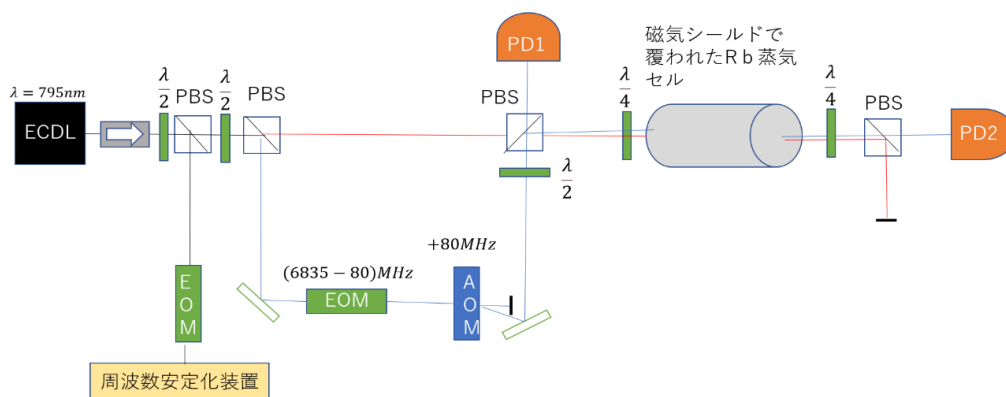


図3 光学系の概略図

4. 光強度の測定と各効率の計算結果

今回は、減速の実験の事前準備として、probe 光および control 光の強度を見積もるために、2つのファイバーEOMのカップリング効率およびAOM1次光の回折効率を測定した。ECDLの電流値を103.04mAに設定したときの強度は、20.80mWであった。各素子の前後の強度比から各効率を計算したところ、図4のように求まった。ここで、周波数安定化に必要な最小強度より、一定の強度をレーザー制御系に分離しなければならない。これらの測定値から、20.44mWをcontrol光,probe光として用いることができることが分かった。probe光を数 μW 、残りをcontrol光として用いることで、強度比を最適化しようと考えて

いる。また v_g の式から、control 光の強度を徐々に弱めることでより著しい probe 光パルスの群速度の減速が期待できる。先行研究より、probe 光パルスは数 μs の遅延を観測できると予想される[3]。

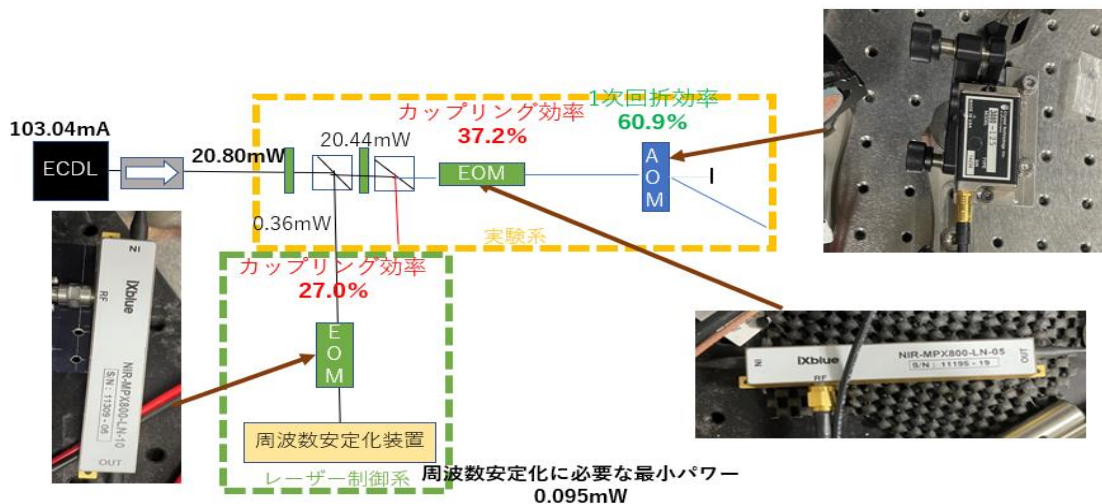


図4 各効率の計算値

5. まとめと今後の展望

今回は、最終的にセルに通す probe 光および control 光の強度を見積もるために、2つのファイバーEOMのカップリング効率、AOMの1次光の回折効率を測定した。また、レーザー制御系に一定のパワーを確保する必要があることから、実験系に使用可能な強度を概算することができた。実際の光の減速に関してはまだ残念ながら測定出来ていないが、今後の展望として、まずは全光学系の強度を調整し、probe 光と control 光の強度比を最適化するための EOM 印加電圧、 ^{87}Rb 蒸気セルのコイルに印加する電流・電圧も見積もり、光の減速の観測を実現したい。

6. 参考文献

- [1] 市村厚一, Quantum Information Processing Using Electromagnetically Induced Transparency, レーザー研究, 31 巻 9 号, 606-611, (2003)
- [2] 光永正治, Optical Information Storage by Quantum Interference, 光学, 32 巻 4 号, 229-233, (2003)
- [3] M. Klein, et al., "Optimizing slow and stored light for multidisciplinary applications Advances in Slow and Fast Light", 6904, 56-64(2008)
- [4] 東松修太郎, 電磁誘起媒質透明化によるコヒーレント光の凍結と再生における緩和の研究, 物性研究, 79(2), 301-323, (2002)