

## Rb 原子気体へ長時間光保存するための光位相同期を用いたレーザー周波数安定化

## Laser stabilization by optical phase-locked loop for long-term photon storage in vaporized Rb atoms

○松本和也<sup>1</sup>, 桑本剛<sup>2</sup>\*Kazuya Matsumoto<sup>1</sup>, Takeshi Kuwamoto<sup>2</sup>

Abstract: We aim to develop the efficient photon storage in atoms using an electromagnetically induced transparency (EIT). We developed the high-efficient laser frequency stabilization system by utilizing an optical phase-locked loop, because the frequency stabilization of lasers is extremely important for EIT experiments. We successfully observed the suppression of relative frequency fluctuation between two lasers. The fluctuation was improved by a factor of 0.05.

## 1. はじめに

従来のコンピューターと比較して、より高効率にデータを処理できる可能性を秘めている量子コンピューターの実現には量子メモリが必要不可欠な要素技術である。2000年5月に Fleishhauer と Lukin により電磁誘起透明化を利用した量子メモリの理論的提案[1]がなされ、現在も EIT を利用した量子メモリの研究は世界中で盛んに行われている。

我々は量子メモリ実現の第一歩となる、<sup>87</sup>Rb 原子気体への電磁誘起透明化を用いた光保存に成功したが、保存時間は 50  $\mu$ s という短い間であった。その原因として、光保存に用いている 2 台のレーザー間の大きな相対周波数揺らぎが考えられる。本講演では、レーザー間の相対周波数揺らぎを抑制する光位相同期を用いたレーザー周波数安定化システムについて報告する。

## 2. 電磁誘起透明化とは

電磁誘起透明化とは、3 準位原子と 2 つの共鳴光の相互作用によって現れる特異な現象である。我々は <sup>87</sup>Rb を用いて 3 準位系を構築している (Fig. 1.)。2 つの共鳴光には、下準位  $5S_{1/2}$ ,  $F=1 \rightarrow$  上準位  $5P_{3/2}$ ,  $F=2$  と一致する周波数のレーザー光 (以後プローブ光と呼ぶ) と、下準位  $5S_{1/2}$ ,  $F=2 \rightarrow$  上準位  $5P_{3/2}$ ,  $F=2$  と一致する周波数のレーザー光 (以後コントロール光と呼ぶ) を用いている。ただし、プローブ光強度に比べてコントロール光強度は非常に強い。その特異な現象とは、本来なら <sup>87</sup>Rb に吸収されるプローブ光が量子干渉効果により吸収されずに透過するという現象である。また電磁誘起透明化が成立する周波数領域ではコントロール光強度によってプローブ光の群速度を操作できる。プローブ光の群速度は

$$V_g = \frac{c}{1 + \frac{g^2 N}{|\Omega|^2}}$$

と記述される。ここで  $c$ : 光速,  $g$ : 原子と光の結合定数,  $N$ : 原子数,  $\Omega$ : コントロール光のラビ周波数 (ラビ周波数の二乗は光強度に比例する) である。

この式で  $\Omega \rightarrow 0$  にすると  $V_g \rightarrow 0$  となる。つまり、コントロール光を <sup>87</sup>Rb 原子気体に照射しなければ、プローブ光は停止する。これらの現象を利用して、我々は光保存を行っている。具体的には、プローブ光が <sup>87</sup>Rb 原子気体中を通過している際にコントロール光の照射を止め、プローブ光を <sup>87</sup>Rb 原子気体に保存するという事を行っている。

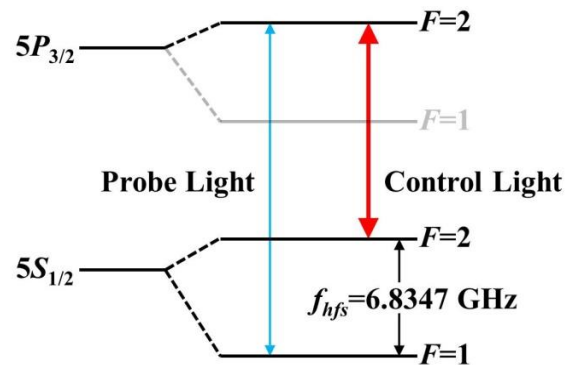


Fig. 1. Energy level diagram of <sup>87</sup>Rb atoms related to EIT experiment.

## 3. 光位相同期の原理

コントロール光及びプローブ光の電場成分は

$$E_C = \alpha_C \cos(2\pi f_C t + \varphi_C)$$

$$E_P = \alpha_P \cos(2\pi f_P t + \varphi_P)$$

と表せる。ここで、 $\alpha$ : 電場振幅,  $f$ : 周波数,  $\varphi$ : 位相である。コントロール光とプローブ光を重ね合わせた時に、検出される信号  $I$  は

$$I = \langle |E_P + E_C|^2 \rangle$$

$$= \frac{|\alpha_P|^2 + |\alpha_C|^2}{2} + |\alpha_P \alpha_C \cos(2\pi(f_P - f_C)t + \varphi_P - \varphi_C)|$$

と表せる。上記の式の第一項目は直流成分、第二項目は交流成分である。光位相同期では第二項目だけを使用する。光ビート周波数は  $f_{\text{Beat}} = f_P - f_C$  である。

光位相同期とは、コントロール光とプローブ光の干渉によって生じる光ビート信号と参照信号の位相差と周波数差が 0 になるよう、プローブ光のレーザーダイオードコントローラにフィードバック制御をするシステムである (コントロール光でも可能)。従

来我々は、 $^{87}\text{Rb}$  の所望の遷移周波数を使って 2 台のレーザーを独立に周波数安定化していたが、この方式ではプローブ光及びコントロール光の周波数揺らぎ  $\delta_p$ ,  $\delta_c$  を完全に抑制する事は困難である。また、独立に安定化を行っているので、相対周波数  $|\delta_p - \delta_c|$  の変動を制御する事はできない。しかし、光位同期を用いた場合は、 $f_p - f_c = \text{Const}$  になるようにフィードバックがかかるので、相対周波数  $|\delta_p - \delta_c| = 0$  になるようにプローブ光は制御される。この制御により、光の保存時間が延ばせると考えられる。

4. 実験装置

実験装置図を Fig. 2. に示す。プローブ光とコントロール光をビームスプリッターで重ね、高速フォトディテクターで光ビート周波数  $f_{\text{Beat}}$  を検出する。ミキサーにより、その光ビート周波数  $f_{\text{Beat}}$  は発振器 1 からの  $f_{\text{hfs}} - 30 \text{ MHz}$  の参照周波数と混合され、 $30 \text{ MHz} + f_{\text{hfs}} - f_{\text{Beat}}$  の周波数が出力される。この出力周波数と発振器 2 からの  $30 \text{ MHz}$  の参照周波数をそれぞれコンパレータに入力し、デジタル信号に変換する。これらのデジタル信号を位相周波数比較器に入力すると、位相誤差と周波数誤差に対応する誤差信号が出力され、サーボ回路[2]へ入力される。ループフィルタは高速フィードバック信号を、積分回路は低速フィードバック信号を出力する。常に  $f_{\text{hfs}} - f_{\text{Beat}} = 0$  となるようにプローブ光の電流コントローラと高速 FET 電流コントローラにフィードバックされる。

電流コントローラは THORLABS 社の LDC202C を使用している。この外部入力特性は  $20 \text{ mA/V}$  で、利得が  $3 \text{ dB}$  に落ちる周波数は  $250 \text{ kHz}$  である。これでは高速フィードバックができないので、高速 FET 電流コントローラを製作して使用した[3]。

5. 実験結果

2 台のレーザーの相対周波数揺らぎの抑制を確認するために、ミキサー後の光ビート信号を ADVANTEST 社の R3265 スペクトラムアナライズで観測した。Fig. 3. と Fig. 4. は光位同期の導入前後の 50 個の光ビート信号の平均である。光位同期の導入前の広い線幅の光ビート信号が、光位同期の導入後では  $30 \text{ MHz}$  付近で相対周波数揺らぎが抑制され、狭い光ビート信号になっているのがわかる。

6. まとめ

集積回路 AD9901 を用いた高速位相周波数比較器と FET を用いた高速電流コントローラを製作して、光位同期を実現した。しかし、 $30 \text{ MHz}$  から  $\pm 500 \text{ kHz}$  の周波数の間しか安定化できていないので、今後回

路の周波数帯域向上等の対策を行い、更なる改善を目指す。

参考文献

[1] M. Fleischhauer, M. D. Lukin, *Phys. Rev. Lett.* **84**, 5094 (2000).  
 [2] M. Prevedelli, *Appl. Phys. B* **60**, S241-S248 (1995).  
 [3] Jurgen Appel, *Meas. Sci. Technol.* **20**, 055302 (2009).

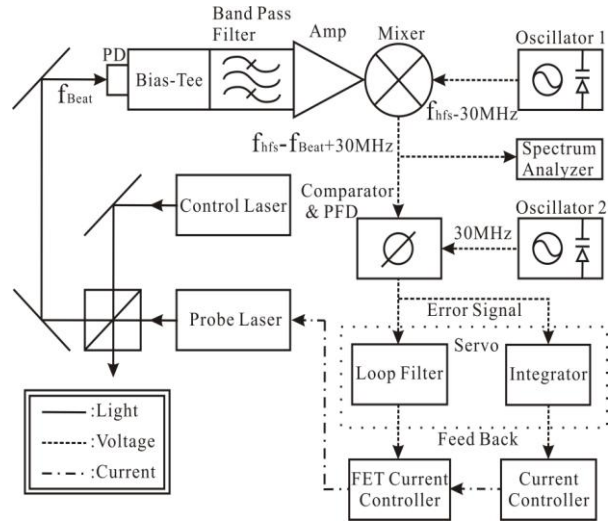


Fig. 2. Experimental setup. Here, PD: Photo Detector, Amp: Amplifier, PFD: phase and Frequency Detector.

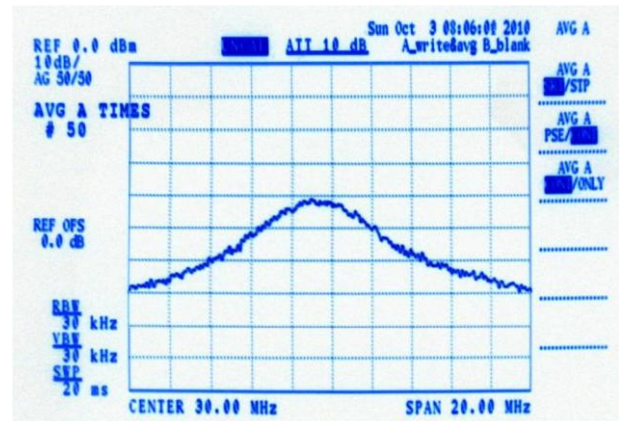


Fig. 3. Beat signal without optical phase-locked loop.

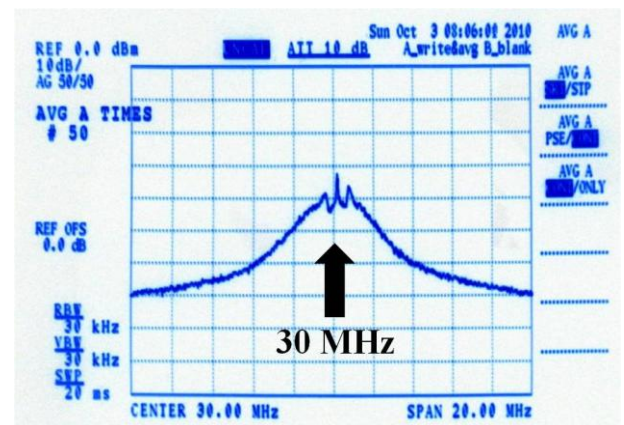


Fig. 4. Beat signal with optical phase-locked loop.