

^{39}K 原子による高フィネス光共振器の安定化に向けた光源の構築

丹治研究室 石井勇輔

1. 序章

光による量子計算[1]や量子暗号通信[2]が近年盛んに研究されている。これらにおいては光同士を相互作用させることで情報を処理することが効率的であると考えられている。光子同士は直接相互作用することはできないが、物質を介することで実効的な相互作用を得ることができる。しかしこれには通常高強度な光が必要となり、微弱光ではこれは困難である。

当研究室では光共振器中の物質を利用して、少数光子同士の相互作用の観測を目指している。このような光子間相互作用の観測の一例として真空場誘起透明化(VIT)[3]を用いた図 1.1 のような光ディレイスイッチが挙げられる。

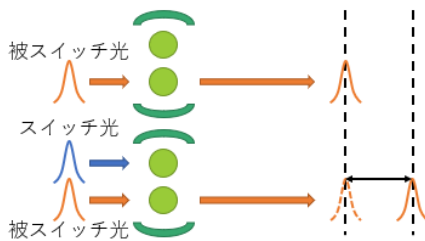
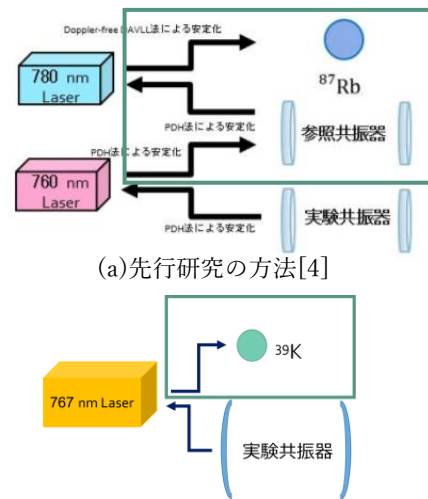


図 1.1 光ディレイスイッチの概略図

光ディレイスイッチでは VIT による被スイッチ光の群速度の低下を利用してパルスの分離を行い、これをスイッチとして利用する。このようにして少数光子による光子間の相互作用を得るためには、光共振器の共振周波数を、光子間相互作用の媒介物質として用いる原子(本研究では ^{87}Rb 原子)の遷移周波数に対して安定化させる必要がある。ところが ^{87}Rb 原子の共鳴周波数の波長の光で実験共振器を直接安定化させる場合、入射する光が共振器中の原子の状態に影響を与えてしまい、光子間相

互作用の観測に支障をきたしてしまう。そこで先行研究では参照共振器を利用することでこの問題を避けていた[4]。その際、図 1.2(a)に示すとおり4箇所での安定化を行う必要があったが、それにより実験系全体を安定的に運用することに困難が生じていた。そこで本研究では ^{39}K 原子を用いることで図 1.2(b)の様に安定化が必要な箇所を2箇所へ減らすことで系全体の安定性の向上を図る。本研究の目的はこの際に必要な波長 767 nm の光源の構築とその周波数安定化である。



(a) 先行研究の方法[4]

(b) 本研究の方法

図 1.2 先行研究における共振器安定化の方法

2. フィルタ型外部共振器ダイオードレーザー(ECDL)の作製と特性評価

2.1 フィルタ型 ECDL の作製

本研究では、干渉フィルタを利用した ECDL を作製した。一般的な ECDL としてよく知られている Littrow 型[5]では、回折格子の角度によって共振構造の光軸調整と波長の選択を同時に行ってお

り、出射する光の方向が波長に依存してしまう。一方で本研究で作製したフィルタ型 ECDL は図 2.1 のような構造を持ち、アウトプットカプラで共振構造の光軸調整を、そして干渉フィルタによって波長選択を、それぞれ行う。従って、波長選択と発振条件の設定を独立に行えることから、Littrow 型のような従来型の ECDL より広い波長範囲での調整が可能である。またフィルタ型 ECDL にはキャッツアイ構造が採用されているため、アウトプットカプラの角度にずれが生じた場合でも、反射した光がレーザーダイオードの端面に集光する。これによって振動に対して強い構造となっている[6]。本研究では eagleyard 社のレーザーダイオード (EYP-RWE-0760-02515-SOT12-0000) を使用し、レンズ 1, 2, 3 の焦点距離はそれぞれ 4.51 mm, 18.40 mm, 11.00 mm とした。

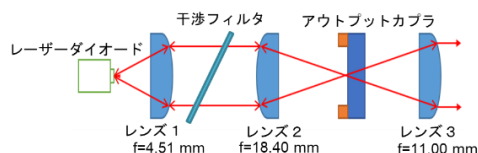


図 2.1 フィルタ型 ECDL の概略図

2.2 フィルタ型 ECDL の発振の特性

作製した ECDL の発振特性を測定した結果、I-P 特性は図 2.2 のようになり、閾値は 29.1 mA であった。

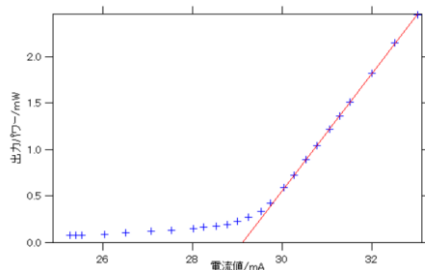


図 2.2 ECDL の I-P 特性グラフ

さらに ECDL がシングルモード発振しているかどうかを確認するためにファブリ・ペロー共振器

にレーザー光を入射し、透過スペクトルを測定した。その結果、図 2.3 のような幅の狭いピークが観測され、またピーク間隔が共振器の FSR 程度であったことから、ECDL がシングルモード発振をしていることが確認できた。

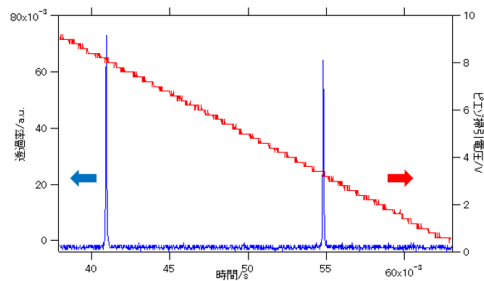


図 2.3 ファブリ・ペロー共振器の透過スペクトル

3. レーザー光の周波数安定化

3.1 Doppler-free Dichroic atomic vapor laser locking (DAVLL)法

本研究ではレーザー光の周波数安定化を、Doppler-free dichroic atomic vapor laser locking (DAVLL)法という DAVLL 法と飽和吸収分光法を組み合わせた方法で行う。

3.1.1 飽和吸収分光法

ガスセルにレーザーを対向させて入射させた場合、光の周波数がガスセル内の原子の共鳴周波数と等しいときには光軸と垂直に運動する原子における飽和効果によりプローブ光の透過率が增大する。それにより、透過したプローブ光の吸収スペクトルには共鳴周波数付近で図 3.1 のようなラムゼイタイプが生じる[7]。

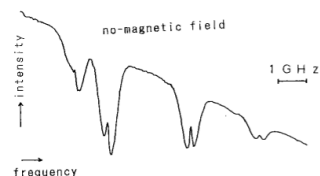


図 3.1 飽和吸収分光法で得られる吸収スペクトル[7]

3.1.2 DAVLL 法

原子に磁場をかけると、直交する円偏光の吸収スペクトルがゼーマン効果により逆方向にシフトする。DAVLL 法では図 3.2 に示すとおりシフトしたスペクトルの差分を取ることで得られる微分信号をエラー信号として利用し安定化を行う [8]。

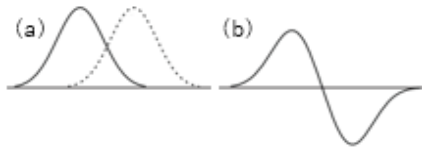


図 3.2 (a)ゼーマンシフトした吸収スペクトルと (b)DAVLL 法のエラー信号 [8]

3.1.3 Doppler-free DAVLL 法

Doppler-free DAVLL 法では、飽和吸収スペクトルに DAVLL 法を適用することによりエラー信号を生成してレーザー周波数を安定化させる [8]。



図 3.3 (a)ゼーマンシフトした飽和吸収スペクトルと (b)Doppler-free DAVLL 法のエラー信号 [8]

3.2 Doppler free DAVLL 法のセットアップ

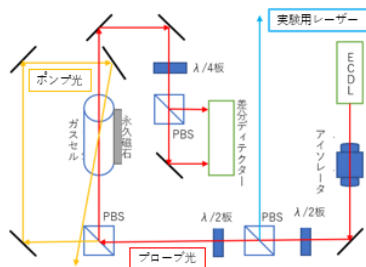


図 3.4 光学系

Doppler-free DAVLL 法による安定化に向けて、光学系のセットアップを行った。ECDL から出た光を偏光ビームスプリッター (PBS) によってプロ

ーブ光とポンプ光の 2 つに分けた。この時ポンプ光がプローブ光よりも十分に強くなるように $\lambda/2$ 板の角度を調整した。これを 2 つの光を永久磁石により磁場をかけた K の飽和ガスセル中で交差させ、透過したプローブ光を $\lambda/4$ 板と PBS を用いて直交する 2 つの円偏光成分に分ける。そして、これらを差分ディテクターで検出し、2 つのスペクトルの差分であるエラー信号を得る。

3.3 ラムディップの幅とロックの精度

飽和吸収分光法において入射する 2 つのレーザー光が完全には対向していない場合、各原子の持つ速度に応じて飽和吸収が起こる周波数がシフトし、それにより得られるラムディップの幅が広がってしまう。実際、前節のセットアップにおいては、ポンプ光とプローブ光のなす角は $\theta = 0.716^\circ$ となったため、この角度が共振器の安定性に及ぼす影響について考えた。

ポンプ光とプローブ光のなす角と飽和吸収の周波数のシフトの関係は原子のドップラー効果を考慮すると、

$$\Delta\nu = \frac{2\pi}{\lambda} u \sin\theta \sin\frac{\varphi}{2} \quad (3.1)$$

と求まる。ただし、 $\lambda = 767 \text{ nm}$ 、 $T = 300 \text{ K}$ 、 $u =$

$\sqrt{\frac{2k_B T}{M}}$ であり、 k_B はボルツマン定数、 M は原子の質

量、 φ は原子の進行方向と 2 つのレーザー光の光軸の張る面のなす角、 θ はポンプ光とプローブ光のなす角である。ラムディップの形状を表す関数はローレンツ関数のピーク周波数が式 (3.1) に従って分布することから式 (3.2) となった。

$$g(\omega) = \int_0^\pi \frac{1}{1 + \frac{(\omega - \omega_0 - \frac{2\pi}{\lambda} u \sin\theta \sin\frac{\varphi}{2})^2}{\Gamma^2}} d\varphi \quad (3.2)$$

ここで Γ は ^{39}K の自然幅の半分である。これより予想されるラムディップは図 3.5 のようになり、その半値全幅は 9.6 MHz となった。

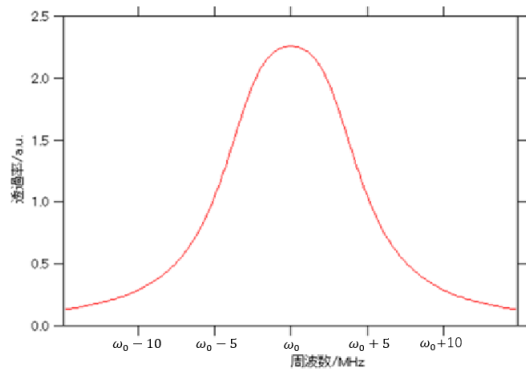


図 3.5 ポンプ光とプローブ光のなす角が有限であることにより広がったラムディップ

ここで、波長 767 nm のレーザー光に要求される周波数の安定度について考える。安定化された共振器の、波長 780 nm 付近での共振周波数の揺らぎは、 ^{87}Rb の線幅 6 MHz よりも十分に小さい必要がある。仮にこの揺らぎを 600 kHz とした時、共振器を安定化させるために用いる 767 nm の光に要求される周波数安定度は、図 3.6 に示すとおり、

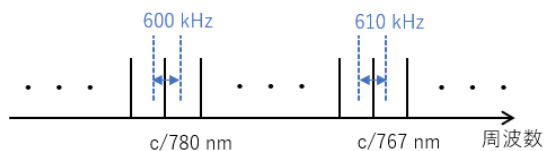


図 3.6 周波数と周波数揺らぎの関係図

$$\Delta f_{767} = \Delta f_{780} \times \frac{780 \text{ nm}}{767 \text{ nm}} \quad (3.3)$$

と表され、610 kHz 程度以下であることが分かる。これを実現するには、エラー信号のスロープの幅がこの 10 倍程度の 6.1 MHz 程度以下であればよい。Doppler-free DAVLL 法におけるエラー信号の最適なスロープの幅はラムディップの幅の 0.581 倍であり、これを 6.1 MHz 程度以下とする必要がある。従って、ラムディップの幅が約 12 MHz 程度より小さくなれば良い。本研究のセットアップではラムディップの幅が 9.6 MHz であり、これを用いて波長 767 nm のレーザー周波数を安定化させれば、共振器の共振周波数の十分な安定度が得られると予想される。

4. まとめと展望

本研究では、少数光子による光子間相互作用の観測に向けて、光共振器の安定化に用いる光源及びその周波数安定化のための光学系を構築した。光源としてはフィルタ型 ECDL を作製し、発振特性を測定したところ、閾値が 29.1 mA となった。また、ファブリ・ペロー共振器の透過スペクトルからレーザーがシングルモード発振していることを確認した。さらに、光源の周波数安定化に用いる Doppler-free DAVLL 法のセットアップにおいて得られることが予想されるラムディップ幅を評価した結果、9.6 MHz となり、これを用いれば十分な共振器の安定性が得られることが予想される。今後は作製した ECDL の線幅を測定し、実際に Doppler-free DAVLL 法によるレーザー周波数の安定化を行う。さらに、安定化されたレーザー光を利用して共振器の安定化を行う。

参考文献

- [1] P Pillet *et al*, Journal of Physics: Conference Series **194** 012066 (2009).
- [2] R.P. Ablel *et al*, Appl. Phys. Lett. **94** 071107 (2009).
- [3] H. Tanji-Suzuki, *et al*, Science, **333** 1266(2011).
- [4] 山崎直樹, 2018 年度, 電気通信大学修士論文
- [5] L. Ricci, *et al*, Opt. Commun. **117**, 541(1995).
- [6] X. Baillard *et al*, Optics Communications **266**, 609-613(2006).
- [7] 上野隆 *et al*, 電子情報通信学会論文誌 **J76-C-I**, 10-17 (1993).
- [8] T. Peteski. *et al*, Eur. Phys. J. D **22**, 279-283 (2003).