

Doppler-free DAVLL を用いた外部共振器型ダイオードレーザーの周波数安定化

丹治研究室 櫻井明彦

平成 29 年 3 月 10 日

1 序論

日常目にする光は古典的な波として理解されるが、強度の弱い光の場合波の性質と粒子としての性質の両方が現れる。このような光子が持つ量子力学的性質を利用する技術が世界中で提案されている。中でも量子暗号通信は実用化が近い技術で、インターネット等の通信技術が普及している現代において重要性が増しているものである。量子暗号は一つの光子に暗号化する鍵を乗せることで安全に暗号鍵を配布するものである。安全である理由は単一光子がこれ以上分割することができず、盗聴などにより観測された場合に量子状態に痕跡を残すためである。量子暗号の実用化や量子情報処理技術の発展のためには単一光子発生は非常に重要なものである。しかし、現状としてオン・デマンドで光子を一つだけ発生させることは難しい。本研究室では、ファブリー・ペロー型光共振器中にトラップしたルビジウム原子を用いた単一光子発生を目指している。本研究はそのような単一光子源の実現のための中性原子集団生成を行う実験系の構築に向けたものの一歩である。磁気光学トラップ (magnetical-optical trap : MOT) での中性原子集団の生成を目指し、それに用いるレーザーの参照光となる外部共振器型ダイオードレーザーの作製と周波数安定化を行った。レーザー周波数は ^{87}Rb の吸収線に安定化させるため、 ^{87}Rb の自然幅 6 MHz 以下の安定性を目標とした。

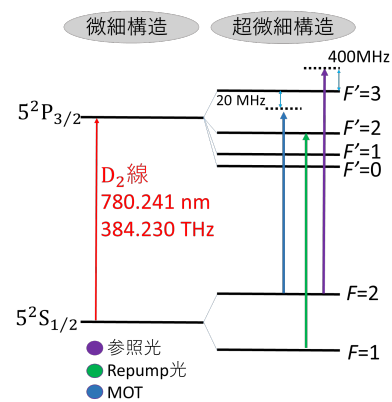


図 1: ^{87}Rb 原子の準位構造

2 原理

2.1 Filter 型外部共振器ダイオードレーザー

外部共振器型ダイオードレーザー (external cavity diode laser: ECDL) とは、レーザーダイオードの外部に共振器を設置することにより、単一縦モード発振を実現するとともに、実効的な共振器長を大きくすることによって発振線幅を狭くすることが可能なレーザー光源である。ダイオードのゲイン帯域と共振器の縦モードの周波数が重なるところにおいて引き込み現象が起き、レーザー発振が起こる。今回作製した filter 型 ECDL [1] ではさらに干渉フィルターを用いて共振器の縦モードを切り取ることができるのでレーザーの発振波

長を選択することができる。干渉フィルターは屈折率の異なる誘電体が積層された誘電体多層膜のフィルターであり、フィルター面と入射光のなす角度によって透過する波長帯域が異なるという性質を持つ。

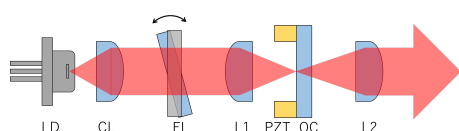


図 2: ECDL の概略図

2.2 飽和吸収分光法

原子に準位間のエネルギーに対応する周波数のレーザー光を照射すると、原子はレーザー光を吸収し励起される。励起した原子はある時間が経過すると蛍光を発生しながら基底状態に遷移する。この吸収を利用してレーザー光の周波数を決定するものがレーザー分光であるが、その一つに今回用いた飽和吸収分光法 [2] がある。図 3 に飽和吸収分光法のセットアップを示す。

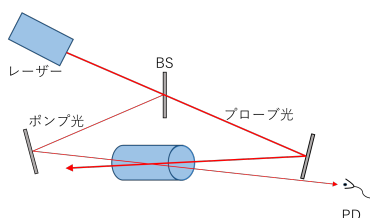


図 3: 飽和吸収分光法のセットアップ

飽和吸収分光法は強い光により原子の遷移を飽和させることで、通常は大きなドップラー広がりを持つ室温の原子気体においても自然幅程度のスペクトルを観測することができる手法である。この方法では、ビームスプリッター (BS) によりレーザー光を弱いプローブ光と強いポンプ光に分け、2つのビームを対向させてガスセルに入射し、透過したプローブ光の光強度を検出する。レーザー周波数が共鳴周波数とほぼ等しいとき、ドップラー

効果を考慮すると2つのビームは共に速度 $v \approx 0$ の同じ速度の原子と相互作用するため、原子は光強度の強いポンプ光を吸収し、プローブ光はそのままガスセルを透過する。そのためプローブ光の吸収スペクトルを観測すると、元々ドップラー広がりにより線幅が1 GHz ほどあるものの頂点に狭いディップを得ることができる。このディップはラムディップと呼ばれ、ディップの線幅は自然幅程度になる。

2.3 Doppler-free Dichroic Atomic Vapor Laser Locking (DAVLL)

Doppler-free DAVLL [2] を用いることで原子の吸収線にレーザーの周波数を安定化させることができる。今回の実験では安定化の基準として MOT による冷却及び捕獲を目指す Rb 原子を用いた。Doppler-free DAVLL の基本的な原理は、図 4 のように少し周波数差のある飽和吸収スペクトルの差分を取ることで得られるエラー信号を用いてレーザーにフィードバックをかけて周波数を安定化させるというものである。

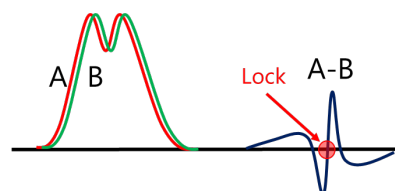


図 4: Doppler-free DAVLL 基本原理

周波数差のある飽和吸収スペクトルは、磁場によるゼーマンシフトで準位の分裂を生じさせ、それに対して σ_+ 偏光と σ_- 偏光を用いて異なる磁気副準位に原子を遷移させることで得ることができる。磁場はガスセルに導線を巻きつけることで発生させた。得られた2つの飽和吸収スペクトルの差分を取ることで共鳴周波数で強度が0となるエラー信号を得ることができる。磁場を変化させてディップのずれを調整することでエラーシグナ

ルの傾きを最大化することができ、ロックの精度が向上する。Doppler-free DAVLL 法の特徴としてパワーの揺らぎに対して安定性があるということが挙げられる。たとえレーザーのパワーが揺らいだとしても2つの飽和吸収スペクトルは同じように揺らぐため差分信号を取った際に強度がゼロになる点が変わらないためである。

3 実験

3.1 作製した ECDL の出力光強度測定

作製した ECDL の発振特性を調べるために閾値電流付近の光強度を測定したものを図5に示す。図5より、作製した ECDL の閾値電流は 14.77 ± 0.06 mA となった。

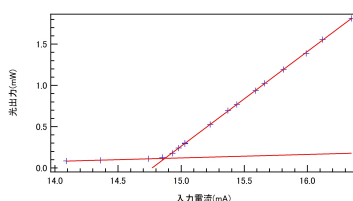


図 5: 発振付近の電流－光出力特性

次に電流値を上げていったときの光出力特性を図6に示す。電流値を上げていくにあたって PD での反射光により LD が破損してしまうことを防ぐため光路にアイソレータを挿入した。図6はあらかじめ測定したアイソレータ透過率 (71.8%) を用いて、測定されたパワーを ECDL 出射直後のパワーに換算してプロットしたものである。

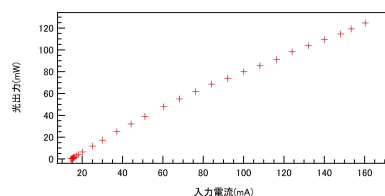


図 6: 光出力特性

飽和吸収分光に必要なポンプ光のパワー強度は飽和強度 (I_{sat}) 程度であり、 ^{87}Rb の場合、 $I_{\text{sat}}=3.58$ mW/cm^2 である [3]。ポンプ光のビーム断面積は 0.00471 cm^2 であり飽和吸収分光に必要なパワーは 1.69 μW となる。よって作製した ECDL からは飽和吸収分光に十分なパワーが出力されていることが確かめられた。

3.2 飽和吸収スペクトルの測定

3.2.1 飽和吸収スペクトルの測定方法

本研究のために組んだ Doppler-free DAVLL の光学系を図7に示す。ECDL から出た光は AOM を往復で2回透過することで 400 MHz の周波数シフトを受けた後、PBS によりプローブ光とポンプ光に分けられる。プローブ光は s 偏光であり、これは σ_+ 偏光と σ_- 偏光の 1:1 の重ね合わせだとみなすことができるので、ガスセルを透過したプローブ光を $\lambda/4$ 板と PBS を用いて σ_+ 及び σ_- 偏光に対応する直交する2つの直線偏光に分けることで、少し周波数差のある2つの飽和吸収スペクトルを得ることができる。ゼーマンシフトを起こすための磁場はガスセルに巻いたソレノイドコイルにより発生させ、本研究では 11 G をかけた。

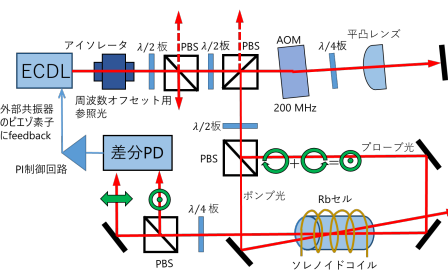


図 7: DAVLL の光学系

3.2.2 飽和吸収スペクトルの測定結果と周波数安定性の評価

ピエゾ素子にかかる電圧を掃引したときに得られた飽和吸収スペクトルが図8である。赤線が σ_+

偏光、緑線が σ_- 偏光による飽和吸収スペクトルを示している。 piezodrivaに入力するファンクションジェネレータ (FG) の信号は周波数 50 Hz、振幅 700.0 mVp-p、オフセット電圧 + 350 mVoc に設定し、piezodrivaのオフセット電圧は 16.63 V とした。またこの飽和吸収スペクトルの差分を取ることで得られたエラー信号を図 9 に示す。今回ロックしたスロープを赤点線で囲った。このスロープに対してロックした際のエラー信号を図 10 に示す。

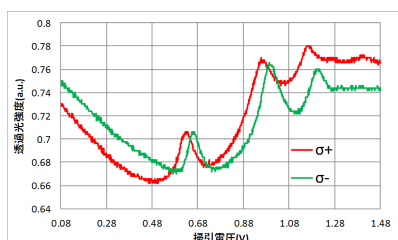


図 8: 飽和吸収スペクトル

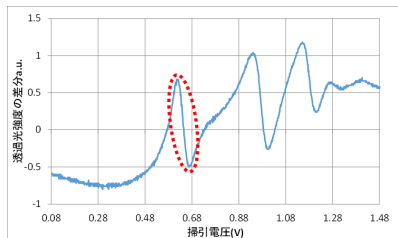


図 9: 得られたエラー信号

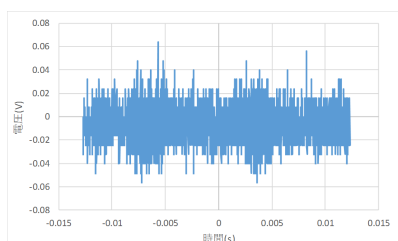


図 10: ロック後のエラー信号

図 8 の飽和吸収ピーク間の時間差と異なる遷移間の周波数差及び図 9 の赤点線で囲ったスロープ

の傾きから、図 10 において観測された中心周波数のゆれの大きさを求めると 302 kHz となった。

4 まとめと今後の展望

本研究では光共振器中の冷却原子集団を用いた光の量子状態の制御を目指し、磁気光学トラップ (MOT) でのルビジウム原子トラップの基盤となる光源の作製と周波数安定化を行った。

光源である ECDL の閾値電流は最適化の結果 14.7 mA となった。また、MOT により Rb 原子を冷却する上で共振周波数が原子の共鳴周波数に安定化されている必要があるため Doppler-free DAVLL を用いて周波数安定化を行った。その結果 Rb 原子の $F = 2 \rightarrow F' = 3$ の遷移に対して 302 kHz 程度の周波数揺らぎで安定化させることができた。

本研究で作製したレーザーは MOT に使用するその他の光源の周波数をロックする上で参照光となるものである。今後の展望としてはまず周波数オフセットロックを用いて MOT 用レーザーと repump レーザーの周波数を安定化させる。また光源の準備が整った後は MOT により原子を冷却することを目指している。

参考文献

- [1] X. Baillard, P. Rosenbusch "Interference-filter-stabilized external-cavity diode lasers" et al. Optics Communications **266**,609-613(2006).
- [2] T. Petelski, M. Fattori, G. Lamporesi, J. Stuhler, and G.M. Tino, "Doppler-free spectroscopy using magnetically induced dichroism of atomic vapor: a new scheme for laser frequency locking" Eur. Phys. J. D, **1 - 5**(2002)
- [3] Daniel Adam Steck, "Rubidium 87 D Line Data", Oregon Center for Optics and Department of Physics, University of Oregon (2015)