

高フィネス光共振器の安定化に向けた高安定レーザーの作製

丹治研究室 志村一樹

1 研究背景

近年、量子科学分野において、光を用いた量子技術に関する研究が盛んに行われてきており、量子計算や、量子暗号通信などはその代表例として挙げられる。これらの発展のためには、光子間の強い相互作用（少数光子での非線形光学効果）が重要な鍵を握る。しかし、光子同士は直接相互作用をすることができず、また、数光子レベルの微弱光では強度が足りず、従来の非線形光学結晶を用いることができないなどの問題がある。これらの解決策の一つとして共振器量子電気力学 (cavity QED) で扱われる共振器モード中の光子と原子の強い相互作用の利用が考えられる。当研究室では特に、cavity QED の現象の一つである真空場誘起透明化 (VIT) を用いた単一光子スイッチの実現を目指している。

VIT とは図 1 に示すような三準位原子の $|f\rangle \rightarrow |e\rangle$ 遷移に共鳴した共振器モードの真空場によって $|g\rangle \rightarrow |e\rangle$ 遷移に共鳴するプローブ光が透過する現象である。この時プローブ光の透過率の上昇に伴い、屈折率の急峻な変化が起こるため、群速度が変化する（共振器モード中の光子が少ないほど群速度は低下する）。共振器モード中に存在する光はプローブ光が原子により散乱されたものとなるため、プローブ光（少数光子）の光子数に応じてプローブ光自身の群速度が変化する。つまり、実効的な光子間相互作用を引き起こすことができる。

2 本論文の目的

VIT の実験系では、実験共振器の共振周波数を原子の遷移周波数に対して安定化させる必要がある。このとき、共振器内にトラップされる ^{87}Rb 原子の状態に影響を与えないよう、共振器を安定化させる

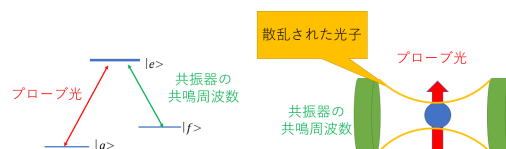


図 1 真空場誘起透明化

ためのレーザーの波長は ^{87}Rb 原子の共鳴線 (780 nm) から十分離れている必要がある。現状、当研究室では図 2 のような系を用いて共振器の安定化を行っている。この系では、 ^{87}Rb 原子の共鳴周波数に

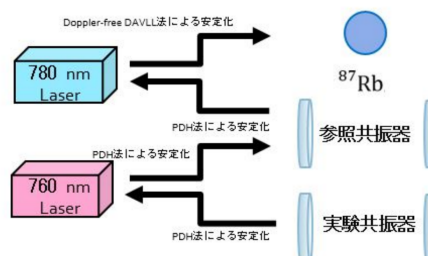


図 2 現状の共振器安定化の実験系 [1]

対して 780 nm のレーザーを安定化させ、そのレーザーで参照共振器を安定化させ、参照共振器で 760 nm のレーザーを安定化させ、さらにそのレーザーで実験共振器を安定化させている。つまり、現状の実験系では 4 箇所での安定化が必要となっている。安定化の必要な箇所が多いほど、実験系全体を安定的に稼働させることが困難になるため、本研究では、参照共振器の代わりにカリウム原子を基準として用いることで、安定化の必要な箇所を 2 箇所に減らした図 3 のような系の構築を目指している。

VIT を引きおこすための実験共振器は線幅 68

kHz[1] であるため、共振器安定化用のレーザーはこれと同程度以下の線幅をもつことが望ましい。ゆえに、本研究では実験共振器長安定化用の波長 766.7 nm の外部共振器ダイオードレーザーおよびその電流源の作製と評価を目標とした。

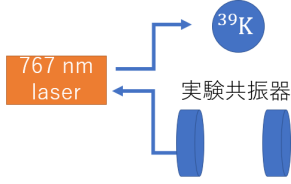


図3 改良された共振器安定化の実験系

3 外部共振器型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 (LD) 端面と外部のミラーにより共振器を構成することによって、発振波長の選択や、線幅の狭窄化を可能にしたレーザーのことをいう。この構成では、ダイオードの二つの端面から成る共振器と比較して共振器長を長くすることができ、結果として線幅を小さくすることができる。しかし、同時に free spectral range も小さくなるため、マルチモード発振が起りやすくなる。これを防ぐ方法として、ECDL では一般に回折格子や干渉フィルタを用い、発振周波数を制限する。本研究では、干渉フィルタの角度を傾けることによって波長選択を行うことができる干渉フィルタ型外部共振器ダイオードレーザー [2] を用いた。

3.1 干渉フィルタ型外部共振器ダイオードレーザー

今回用いる干渉フィルタ型 ECDL の概略図を図4に示した。外部共振器はアウトプットカップラ (OC) と LD の端面で構成されている。この共振器中に置かれた干渉フィルタを傾けることによって波長選択を行うことができる。干渉フィルタを角度 θ 傾けたときの透過波長は、干渉フィルタの実行屈折

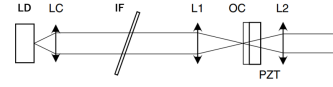


図4 干渉フィルタ型外部共振器ダイオードレーザー [2]

率 n_{eff} を用いて以下のように表される。

$$\lambda(\theta) = \lambda_0 \sqrt{1 - \left(\frac{\sin \theta}{n_{\text{eff}}} \right)^2} \quad (1)$$

3.2 ECDL の線幅

ECDL の線幅 $\Delta\nu$ は

$$\Delta\nu = \frac{\pi h \nu_m (\Delta\nu_c)^2 (1 + \alpha^2)}{P_m} n_{\text{sp}} \quad (2)$$

により見積もることができる [3]。 P_m は共振器モード中のパワー、 n_{sp} は自然放出による光子数 (発振閾値以上では 1)、 α はヘンリーの α 因子、 ν_m は共振器モード中の光の周波数である。また、 $\Delta\nu_c$ は共振器の線幅であり、

$$\Delta\nu_c = \frac{c}{2\pi L_{\text{eff}}} \left(\kappa_L L_D - \ln \sqrt{R_{\text{eff}}} \right) \quad (3)$$

で与えられる [3]。ここで、 R_{eff} は共振器の実効反射率であり、LD 端面の反射率 R_1 と OC の反射率 R_2 を用いて $R_{\text{eff}} = R_1 R_2$ と表される。また、 L_D は LD の長さ、 L_{eff} は実効的な外部共振器長、 κ_L は LD 内部の損失係数である。本研究で作製した ECDL のパラメータを代入すると、レーザー線幅の理論限界の概算値は 670 Hz 程度となり、目標とするレーザー線幅 68 kHz よりも十分小さいことがわかる。しかしながら、ここまででは考慮されていない、電流源の電流揺らぎにより、実際の線幅はこれよりも大きくなる。

4 レーザー線幅に対する電流揺らぎの寄与

レーザーの駆動電流の変化は、一般にジュール熱とキャリア密度の変化による LD 長及び屈折率の変化を引き起こし、これらによりレーザーの発振周波

数に変化する。ダイオードレーザーの単位電流当たりの周波数変化の典型的な値は $-3 \text{ MHz}/\mu\text{A}$ である [3]. LD を ECDL に組み込んだ場合には、共振器における光帰還によりこの値が $-0.3 \text{ MHz}/\mu\text{A}$ まで抑えられる [4]. 本研究に用いる ECDL についても同様であると仮定すると、 68 kHz 以下の線幅を持つレーザーを作るためには、電流源の電流揺らぎを $|68 \text{ kHz}/(-0.3 \text{ GHz}/\mu\text{A})| \sim 230 \text{ nA}$ 以下に抑える必要がある。

5 実験系の作製と評価

5.1 電流源の作製

本研究では、図 5 の回路を用いて電流源を自作し、そのノイズ特性を評価した。なお、この回路はマサチューセッツ工科大学の Vuletić 研究室で設計されたものである。

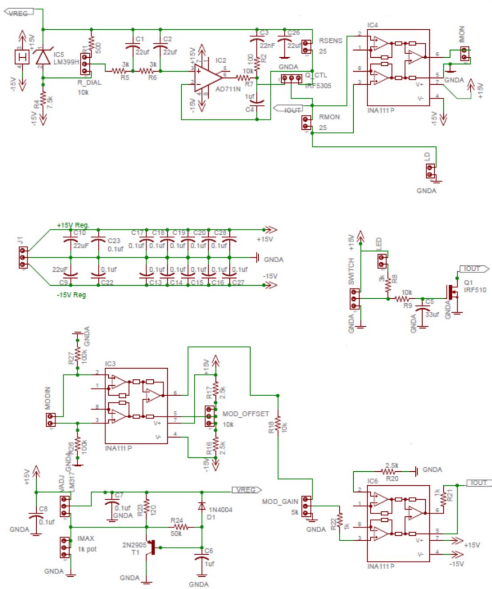


図 5 電流源の回路図

作製した電流源の外観を図 6 に示す。フロントパネルでは、電源の on/off、電流の上限值及び電流値の設定、外部入力及びその振幅とオフセットの制御ができる。また、電流のモニター用の出力を備える。



図 6 作製した電流源

5.2 電流源の電流ノイズ評価

電流源のノイズ特性の評価は、固定抵抗器を用いて出力電流を電圧に変換することにより行った。得られた電圧信号は、図 7 に示すように、カットオフ周波数が 0.7 Hz のハイパスフィルタを用いて直流成分を取り除いたのち、増幅器を用いて増幅した。このとき、使用する固定抵抗器で発生する熱雑音による電流揺らぎは目標とする電流源の電流揺らぎ (230 nA) よりも十分小さくなければならない。熱雑音による電流ノイズ密度は $i_n = \sqrt{4k_b T/R}$ と表され、温度 300 K 、測定帯域 2 MHz としたとき、電流揺らぎ $i \ll 230 \text{ nA}$ となるためには、 $R \gg 0.6 \Omega$ である必要がある。また、電流源の出力電圧の上限を考慮した結果、 $R = 51 \Omega$ の抵抗を使用した。

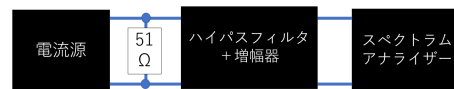


図 7 LDC のノイズ測定概要

また、ハイパスフィルタを含む、作製した増幅器の回路図を図 8 に示す。オペアンプは LT1028 を用い、十分な増幅率と帯域を得るために二段増幅とした。増幅器の周波数特性を測定した結果を図 9 に示す。

図 10 は今回作製した電流源と Koheron 社製の電流源 (DRV100-A-200) の電流ノイズスペクトル密度の $10 \text{ Hz} \sim 2 \text{ MHz}$ における測定結果である。自作の電流源の測定帯域全体での電流揺らぎ (rms 値) は、 $1 \mu\text{A}$ となった。ノイズフロアは、抵抗の熱雑音 (理論値: $0.8 \text{ nA}/\sqrt{\text{Hz}}$) によるものだと考えて矛盾

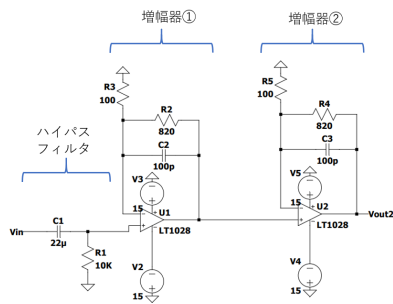


図8 増幅器の回路図

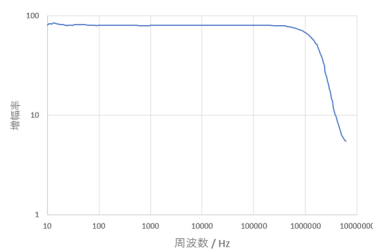


図9 増幅器の周波数特性

しない値となっていることから、測定方法は妥当であったといえる。一方、Koheron社製の電流源の電流揺らぎの測定結果は10 μA となり、データシートの値(10 Hz~1 MHzの帯域で320 nA)を大幅に上回った。これは、作製した電流源の評価用回路における接触不良などが原因であると考えられる。

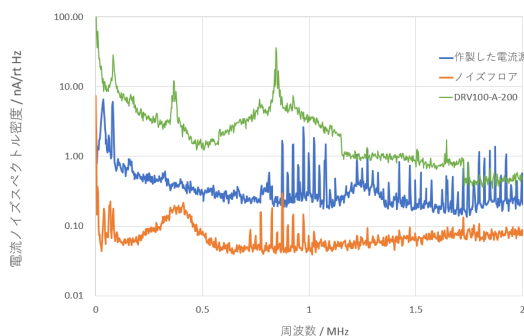


図10 電流源ノイズスペクトル

5.3 ECDLの作製

実際に作製中の干渉フィルタ型ダイオードレーザーを図11に示す。側面には電源入力端子のほか、外部共振器長制御用のピエゾ素子用入力端子と、

電流による高速なフィードバックを可能にするRF用入力端子がある。また、LDは温度によって発振周波数が変化するため、サーミスタと、ペルチェ素子を利用して、温度を安定化できている。さらに、LDの電流入力端子には、サージ電流の対策として保護回路が設置されている。

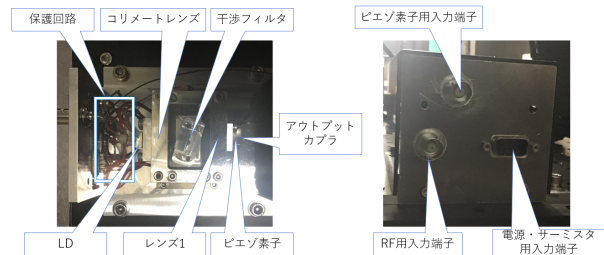


図11 作製中のECDL

6 まとめと展望

本研究では、VIT観測に向けた実験共振器安定化用レーザーである狭線幅レーザーの作製に向けて、電流源の作製・評価及び、干渉フィルタ型ECDLの作製を行った。自作した電流源の電流揺らぎは1 μA となり、要求されるもの(230 nA)よりも大きくなったため、今後は、接触抵抗の低減や、電流源の周波数帯域の制限を行い、さらなる電流揺らぎの低減を試みる予定である。また、今回作製した干渉フィルタ型ECDLの周波数を、飽和吸収分光を用いてカリウムのD2線(766.7 nm)に対して安定化させ、このレーザーを用いて実験共振器の安定化を行う予定である。

参考文献

- [1] 山寄直樹. 電気通信大学修士課程卒業論文, 2019.
- [2] X Baillard, et al. *Optics Communications*, Vol. 266, pp. 609–613, 10 2006.
- [3] Sebastian D Saliba, et al. *Applied optics*, Vol. 48, No. 36, pp. 6961–6966, 2009.
- [4] H Talvitie, et al. *Review of scientific instruments*, Vol. 68, No. 1, pp. 1–7, 1997.