

Rb 原子のリドベルグ状態励起用高出力

周波数安定化レーザーの開発

中川研究室 竹村 直貴

2016年3月1日

1. 研究目的

我々の研究室では単一中性原子を用いた量子情報処理へ応用を目指して研究を進めている。そのためには単一中性原子を量子ビットとし、リドベルグブロッケードを用いた量子ゲート操作を行う必要がある我々は Rb 原子を用いて単一原子を生成し、それらを任意のアレー状に複数個並べてリドベルグ状態に励起することによる「リドベルグブロッケードを用いた複数個の単一原子間に量子もつれ状態の生成を行うこと」を目指し研究を行っている。

複数個の単一原子間に量子もつれ状態を生成するために行うべきことは、

- (1) 磁気光学トラップ (MOT) および光双極子トラップによる単一原子トラップ
- (2) 単一原子に波長 780nm、480nm のレーザーを照射して、二光子吸収遷移によりリドベルグ状態に励起
- (3) 他の単一原子にも(2)と同様の操作を行い、近接したリドベルグ原子が励起を抑制するリドベルグブロッケード効果を観測

である。(1)は既に同研究室の田村が行った。(2)、(3)の実験を行うには高い周波数安定度をもつ波長 780nm、480nm のレーザー光源が必要となる。波長 780nm のレーザー光

源は既に周波数安定化されたものがある。

波長 480nm のレーザー光源に関しても開発されたものがあつたが、アレー状に複数個並べた単一原子を励起するには出力が 180mW 以上必要であり、既存の光源(最大出力 140mW)では出力が足りなかつた。したがって実験を行うにはさらに高出力で周波数安定化された波長 480nm のレーザー光源が必要となつた。

したがって Rb 原子をリドベルグ状態に励起するための高出力で周波数安定化された波長 480nm のレーザー光源の開発を研究テーマとした。

2. リドベルグブロッケード効果

主量子数 n が非常に大きな電子状態であるリドベルグ状態に励起した原子のことをリドベルグ原子という。リドベルグ原子の特徴として大きな軌道半径 $r_n = n^2 a_0$ を持ち、それにより大きな双極子モーメント $\mu_n = e r_n$ を持つことができるようになる。

したがって、リドベルグ原子間には強い双極子-双極子相互作用が生じるようになる。この双極子-双極子相互作用は原子間距離が数 μm オーダーでも相互作用が生じる。

今、2 個の原子を考える (図 1)。1 個の原子に励起光を照射しリドベルグ状態に励

起する。リドベルグ状態に励起すると、リドベルグ原子は双極子-双極子相互作用によりもう 1 個の原子のエネルギー準位をシフトさせる。このエネルギーシフトに対し、リドベルグ状態の線幅が小さいとき、原子のリドベルグ励起が抑制される。この現象はリドベルグブロッケード効果と呼ばれている。

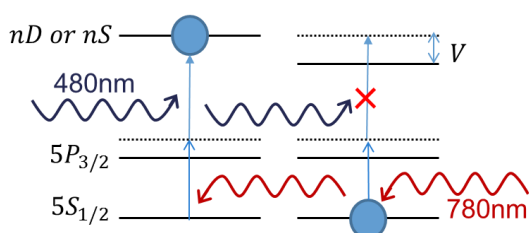


図 1 Rb 原子のリドベルグブロッケード

3. リドベルグ励起用波長 480nm 光源

Rb 原子をリドベルグ状態に励起するために、波長 780nm と 480nm のレーザー光源による二光子吸収遷移を用いる (図 1)。波長 780nm のレーザー光源については既に周波数安定化されたものがあつた。波長 480nm のレーザー光源も開発されたものがあるが、この光源を研究に用いるには出力が足りず、かつ高出力時に出力が不安定になり周波数ロックが外れてしまう問題があつたので新たに高出力かつ周波数安定化された波長 480nm レーザー光源を開発した。

波長 480nm レーザー光源に求められる出力について考える。リドベルグ励起する際には光源をビームウエスト半径 $w_0 = 10\mu\text{m}$ 程度に集光する。励起に必要なパワー密度は $I \approx 10\text{kW}/\text{cm}^2$ 程度となっている。したがって実験を行う際に必要な出力は 30mW 程度となる。しかし、実験系に

レーザー光を移送する際、ファイバーや AOM でロスが生じてしまう。それぞれのロスを 50%程度とすると、レーザー光源で必要な出力は 120mW 程度となる。実際には、他の要因でのロスも起こりうる。したがって、出力は 180mW 以上を目標とした。

次に、光源に求められる周波数安定度について考える。リドベルグブロッケード効果を観測する際、線幅が Rb 原子のエネルギーシフト V より広いと、両方の原子がリドベルグ状態に励起してしまう。ここで、波長 480nm、780nm の二光子によるラビ周波数 Ω は、

$$\Omega \ll \frac{V}{\hbar}$$

を満たす必要がある。例えば 100S でのエネルギーシフト量は 10MHz 程度である [1]。またこのコヒーレントを観測するために線幅 $\Delta\nu$ はラビ周波数 Ω 以下で周波数安定化されている必要がある。

$$\Delta\nu \ll \frac{\Omega}{2\pi}$$

このラビ周波数は数 MHz 程度であるので、周波数安定度は 100kHz 以下を目標とした。

4. 波長 480nm 光源の高出力、出力安定化

波長 480nm レーザー光源は以下の構成により出力している。

- (1) 波長 960nm 外部共振器半導体レーザー
- (2) レーザーの出力を増幅するためのテーパーアンプ
- (3) 第二次高調波発生により波長 480nm に変換

第二次高調波発生に用いた PPKTP 結晶は温度による位相整合を行わなければいけないので結晶はペルチェにより温度を制御

している。

既存の波長 480nm 光源の出力が不安定になる原因として、PPKTP 結晶が波長 480nm の光を吸収することで熱が発生し、結晶の屈折率が変化する「熱レンズ効果」がある。これにより実質的な共振器長が変化してしまい、共振器長ロックが外れてしまう [2]。これを防ぐためには結晶内でのビーム径を大きくし、発生する波長 480nm の光のパワー密度を下げる必要がある。したがって、既存の光源の結晶中心でのビームウエスト半径 35 μm に対し、開発した光源は 40 μm になるように設計した。しかし、このままでは電場強度が落ち、SHG 変換効率も低下してしまう。これを補うために、テーパーアンプを最大出力 1W から 1.5W のものへと変更し、入力光の高出力化を行った。

得られた波長 480nm レーザー光源の出力特性を図 2 に示す。波長 960nm 基本波の入力が 1340mW のとき、181mW の波長 480nm SHG 出力が得られた。

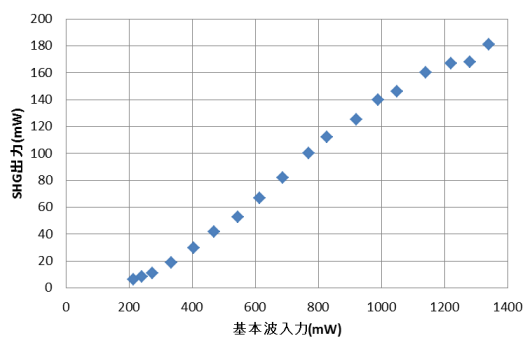


図 2 波長 480nm 光源の出力特性

出力安定化のためには、入力する周波数に合わせて共振器長をロックする必要がある。既存の波長 480nm 光源は EIT 信号を

用いて共振器長ロックをし、共振器の反射光を用いて Pound-Drever-Hall 法(PDH 法)により周波数安定化を行っていた。この方法だと周波数ロックをロバストにすることができるが、EIT 信号の観測に数十 mW もの出力を必要とし、また複雑なセットアップを行う必要がある。したがって今回は EIT 信号による共振器長ロックを行わず、簡単なセットアップで行える Hänsch-Couillaud 法[3]を、周波数安定化はトランスファー共振器を用いた。

Hänsch-Couillaud 法のセットアップは図 3 の構成になっている。PPKTP 結晶は複屈折性を持っており、偏光により実質的な共振器長にわずかな差がある。これを利用し、共振器の波長 960nm レーザー反射光を PBS により偏光ごとに分け、その差分を取ることで誤差信号を得ることが出来る。この誤差信号を共振器ミラーの PZT に返すことにより共振器長をロックし、出力安定化を行うことが出来る。

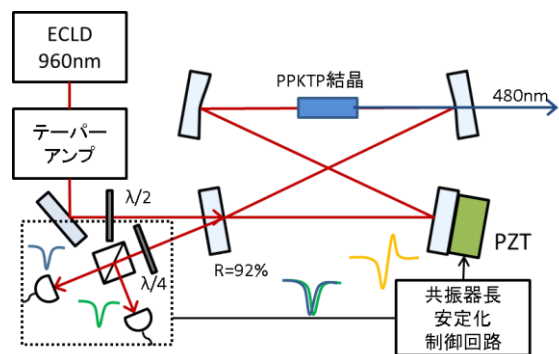


図 3 Hänsch-Couillaud 法の概略図

発振出力 50mW 程度のときの共振器ロックを行う前と後の時間による出力変化をそれぞれ図 4,5 に示した。また高出力時にも共振器長ロックが外れることがなく、安定な

出力が得ることができた。

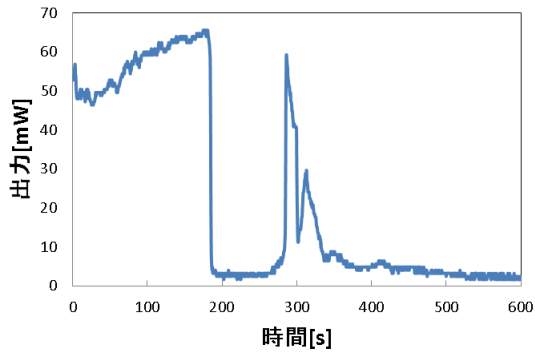


図 4 共振器長ロックなし

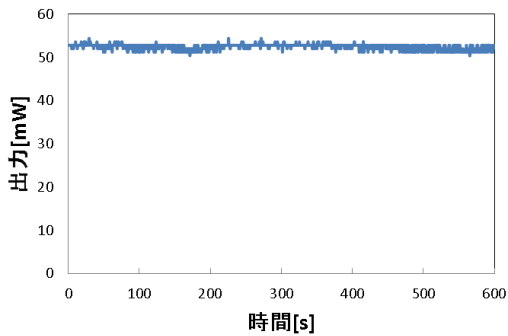


図 5 共振器長ロックあり

5. トランスファー共振器を用いた周波数安定化

周波数安定化にはトランスファー共振器によって既に周波数安定化された波長 780nm レーザ光源を用いた周波数安定度の移送を行った[4]。図 6 に概略図を示す。

- トランスファー共振器の手順としては、
- (1) 周波数安定化されている波長 780nm レーザ光源により共振器長 L を安定化
 - (2) 安定化した共振器に波長 960nm レーザ光源の発振周波数を安定化

である。それぞれの周波数 ν_{780} 、 ν_{960} は空気の屈折率 n_{780} 、 n_{960} 、共振器長 L としてお互い共振器の共振条件

$$\begin{cases} \nu_{780} = \frac{c}{2n_{780}L} \times N_1 \\ \nu_{960} = \frac{c}{2n_{960}L} \times N_2 \end{cases}$$

を満たす必要がある。したがって

$$\nu_{960} = \frac{N_2 n_{780}}{N_1 n_{960}} \times \nu_{780}$$

の時、同時にロックを行うことができ、周波数安定化が可能となる。

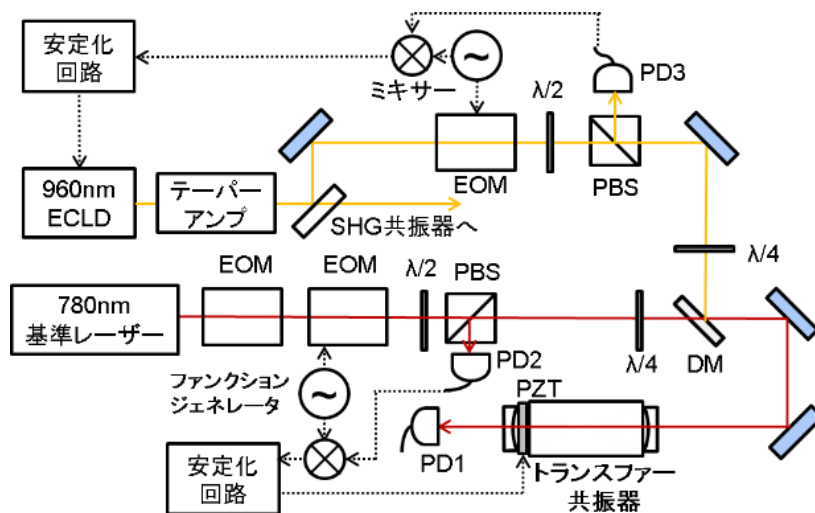


図 6 トランスファー共振器の概要図

しかし、このままでは安定化できる周波数の値が飛び飛びになってしまう。したがって、どちらかのロックを掃引して連続した周波数で安定化する必要がある。今回は780nmを電気光学変調器(EOM:Electro-Optic Modulator)により周波数掃引を行った。共振器長、周波数安定化にはどちらもPound-Drever-Hall法(PDH法)による安定化を行った。

まず、周波数安定化された波長780nmレーザー光を基準として共振器長のロックを行った。図6のフォトディテクター(PD)2で共振器の反射光を測定している。EOMの変調周波数は6.8MHzである。図7に得られた誤差信号を示す。

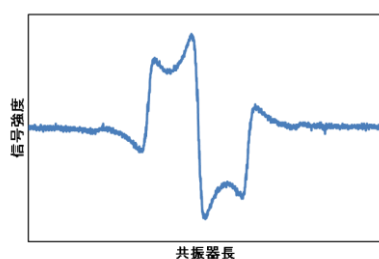


図7 共振器長ロックの誤差信号

この誤差信号を共振器のピエゾに返すことで共振器長のロックを行った。図8はロックした際の周波数ノイズのパワースペクトル密度である。図8から7kHz以下で周波数ノイズを抑えられていることがわかる。

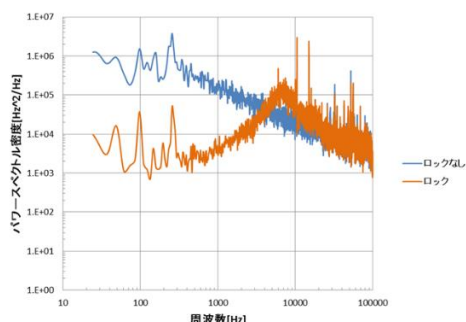


図8 共振器長ロックの周波数ノイズ

次に共振器長を基準に波長960nmレーザー光の周波数のロックを行った。図6のPD3で共振器の反射光を測定している。EOMの変調周波数は15.7MHzである。図9に得られた誤差信号を示す。

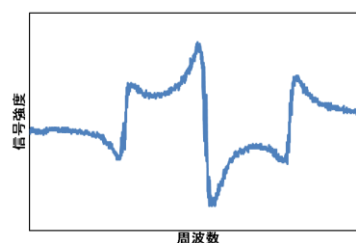


図9 周波数ロックの誤差信号

この誤差信号を波長960nmのECLD電流に返すことで周波数のロックを行った。図10は周波数をロックした際の周波数ノイズのパワースペクトル密度である。図10から十分に周波数ノイズを抑えられていることがわかる。

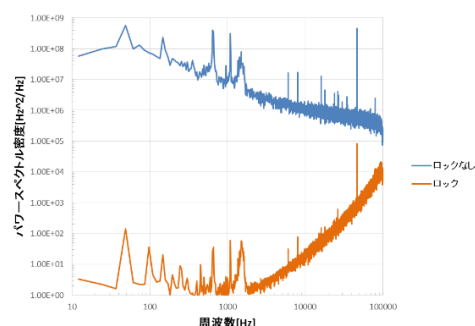


図10 周波数ロックの周波数ノイズ

波長480nm光源の周波数を掃引するために、図6の波長780nm基準光源直後のEOMによりサイドバンドを立たせ、そのサイドバンドを掃引しロックすることで共振器長をロックしながら掃引を行う。このEOMは非共鳴型のものを使用した。キャリアのレーザー光と変調周波数45MHzによるサイドバンドのレーザー光の強度比率

は 1.3%程度だった。このときの誤差信号を図 11 に示す。

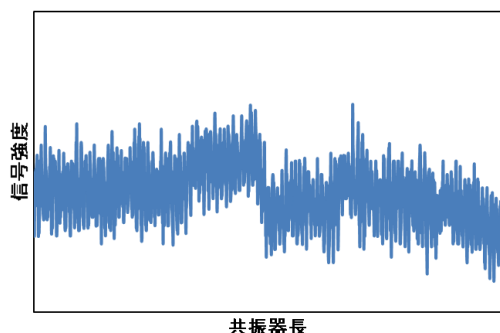


図 11 EOM 周波数掃引による共振器長ロックの誤差信号

図 11 をみると S/N が悪く、この原因はキャリアとサイドバンドの光強度比率の低さに起因するが、EOM の変調指数に対して強度比率は十分なものであり、これ以上の改善は見込めないと思われる。この誤差信号による共振器長ロックは可能だった。しかし、掃引する際に高次の横モードによる誤差信号に重なると、高次の横モードによる誤差信号の方が大きく、そこでロックが移行して掃引できなくなる。したがって、このままでは限定された範囲でしか周波数掃引できず、連続した周波数掃引はできなかった。

6. まとめと今後の課題

本研究ではリドベルグ状態励起用波長 480nm レーザ光源の開発を行った。目標としていた出力を達成し、かつ高出力時にも安定した出力を得る事ができた。周波数安定化についてもトランスファー共振器を用いて共振器長、周波数のロックをすることができた。しかし、EOM による共振器長の掃引ができず、別の手法で掃引を行う必

要がある。例えば AOM により周波数をシフトし共振器長を掃引する方法がある。この方法であればキャリアの周波数自体をシフトするので高次の横モードの影響が出ることは無い。また、周波数と線幅の評価をできていないのでこれも行う必要がある。さらに、SHG 共振器長の安定化は行ったが、波長 960nm 光源の周波数掃引を行った際に追従して安定化されているかどうかの評価する必要がある。

参考文献

- [1] M. Saffman and T.G. Walker “Quantum information with Rydberg atoms” *Rev.Mod.Phys.* **82**, 2313 (2010)
- [2] R. Le Target, J.J. Zondy, P. Lemonde “75%-Efficiency blue generation from an intracavity PPKTP frequency doubler” *Opt.Com.* **247**, 471-481 (2005)
- [3] T. W. Hänsch, B. Couillaud “Laser Frequency Stabilization” *Opt.Com.* **35**, 441 (1997)
- [4] P. Bohlouli-Zanjani, K. Afrousheh and J. D. D. Martin “Optical transfer cavity stabilization using current-modulated injection-locked diode lasers” *Rev.Sci.Instrum*, v. **77**, 093105 (2006)