縮退ラマンサイドバンド冷却用光ポンピング光源の開発

岸本研究室 2133068 竹内和斗

1. 研究背景・目的

本研究室ではボース・アインシュタイン凝縮(BEC)を連続的に生成することを目指している。BEC を生成するためには高い位相空間密度を実現する必要がある。一般的に高い位相空間密度の実現に向けて、レーザー冷却により原子をトラップかつ冷却をし、その後蒸発冷却を行うという手順で位相空間密度を高めている。しかし、この手法は生成時間が長いため BEC の連続的生成に適していない。

そこで、本研究室では全光学的冷却のみを用いて高い位相空間密度を連続的に実現する ことを目指している。そのため、本研究では縮退ラマンサイドバンド冷却を行うことで位 相空間密度を高めることを目指している[1]。縮退ラマンサイドバンド冷却には、原子を単 一の内部状態に掃き寄せる2本の光ポンピング用の光源が必要である。また、先行研究に より光ポンピング光に適切な離調を与えると原子集団の加熱・トラップロスの要因である 光会合・光誘起衝突を抑制でき、位相空間密度を高めることができると分かっている [2]。そのため、本研究では5 $S_{1/2}F = 1 \rightarrow F' = 2$ 遷移と5 $S_{1/2}F = 2 \rightarrow F' = 2$ 遷移の2種類の 光を作成し、加熱・トラップロスを抑制する離調を捜索するためにオフセット周波数をそ れぞれ可変できる光学系を構築する。



図1 原子数損失の周波数依存性[2]

2. 原理

2.1 光ポンピング

光ポンピングとはゼーマン効果により生じる磁気副準位と光の偏光を利用する技術である。図2のように基底状態に存在している⁸⁷Rb原子に対し *m_F* 2

て、 $5S_{1/2}F = 2 \rightarrow 5P_{1/2}F' = 2$ 遷移の σ^- 偏光を照射すると遷 移選択則より磁気副準位 m_F が1減る励起状態へ遷移する。 このように、 $5S_{1/2}, F = 2, m_F = -2$ に掃き寄せるポンピング を m_F ポンピングと言う。しかし、励起状態 $5P_{1/2}F' = 2$ に存 在している原子の一部が基底状態 $5S_{1/2}F = 1$ へ自然放出し てしまいサイクルから外れてしまう原子が存在する。この 原子に対して、 $5S_{1/2}F = 1 \rightarrow 5P_{1/2}F' = 2$ 遷移の σ^- 偏光を照 射することでF = 2のサイクルに戻すことができ、このよ



図2光ポンピングの概略図

うなポンピングをFポンピングと言う。

2種類の光ポンピングにより、 $5S_{1/2}F = 2, m_F = -2$ に掃き寄せられた原子は遷移先が存在しないため $5S_{1/2}F = 2, m_F = -2$ の内部状態に留まり単一の内部状態を生成することが可能である。そして、光ポンピングを行う際には他の遷移が生じないように、狭線幅かつ波長安定化したレーザーが必要になる。

また、原子集団の加熱・トラップロスの要因である光誘起衝突・光会合を抑制できる周 波数帯を捜索するために2種類の光ポンピング光に対して GHz 程度オフセット周波数を それぞれ可変できる光学系を構築する必要がある。

2.2 縮退ラマンサイドバンド冷却[1]

縮退ラマンサイドバンド冷却では図 3 のように光双 極子トラップ(ODT)により生じた振動準位の幅 $\hbar\omega_0$ と ゼーマン分裂により生じる分裂幅が等しくなるように 磁場をかける。ここで、振動状態に存在している原子は ラム・ディッケパラメータ η を持っている。

$$\eta^2 = \frac{E_R}{\hbar\omega_0}$$

 E_R は反跳エネルギー、 $\hbar\omega_0$ は振動エネルギー間隔であ る。このパラメータが $\eta \ll 1$ を満たすときラム・ディ ッケ領域へと到達し、原子は自然放出の際に振動準位 が変化しないように遷移する。先行研究では ODT に 用いている対向光の偏光を調整することで、ラム・ディッケ領域を達成しつつ、振動準位が

Δν = -1となる誘導ラマン遷移を引き起こさせている[3]。

冷却サイクルはFポンピングと m_F ポンピングにより $|5S_{1/2}, F = 2, m_F = -2, v = n$)へ掃き 寄せられた状態から始まる。ODT 光による誘導ラマン遷移 $|5S_{1/2}F = 2, m_F = -2, v = n$) → $|5S_{1/2}F = 2, m_F = -1, v = n - 1$)により振動準位を下げ、 $|F = 2, m_F = -2$)への光ポンピング により冷却サイクルへ戻す。ここで、ラム・ディッケ領域へ到達しているため光ポンピング により励起・放出する過程で振動準位は変化しない($\Delta v = 0$)。その後、 $|m_F = -2, v = n - 1$) → $|m_F = -1, v = n - 2$)へと冷却サイクルを繰り返し、原子は $|5S_{1/2}F = 2, m_F = -2, v = 0$) へと遷移する。

 $|5S_{1/2}F = 2, m_F = -2, \nu = 0$)に遷移した原子は光ポンピング光とトラップ光による励起 先が存在しないため、光と相互作用しない暗状態を形成する。よって、冷却された原子は暗 状態を形成することで原子数密度が大きくなり位相空間密度を高めることができる。

3. 実験

本研究では、2種類のオフセット周波数可変型光ポンピング光源の作成のために2つのフ



ァイバー結合型 EOM を用いる。実験系は図4のように ECDL からの光を PBS で分岐させ それぞれファイバー結合型 EOM へと入射させている。片方は周波数安定化のために飽和 吸収分光法の系へ、もう片方は実験系へと入射させる。また、実験系へと入射させる系は光 の一部をファブリペロー共振器に入射させサイドバンドの強度比をモニターできるように している。



図4 作成した光学系の概要図

周波数安定化の系へと入射させているファイバー結合型 EOM では、EOM に変調周波数 $\Delta_1/2\pi$ をかけサイドバンドを立たせ、サイドバンドを所望の周波数 ω_1 に安定化することでキ ャリアの波長を所望の遷移から周波数 Δ_1 離調することができる。そして、今回用いるファイ バー結合型 EOM は結晶が非常に小さいためかける電圧が小さく、周波数を5GHz まで変調 することができるため、5 $S_{1/2}F = 1 \rightarrow 5P_{1/2}F' = 2$ 遷移から GHz 程度までオフセット周波 数を可変できる。

実験系へと入射させているファイバー結合型 EOM では、 $5S_{1/2}F = 2 \rightarrow 5P_{1/2}F' = 2$ 遷移 に対してオフセットロックを行っている。基底状態 $5S_{1/2}$ のF = 1,2間の周波数差は約 6.834GHz であるため、EOM に変調周波数 $f_m = (\Delta_1 - \Delta_2)/2\pi + 6.834$ GHz をかけることに より発生したサイドバンドは $5S_{1/2}F = 2 \rightarrow 5P_{1/2}F' = 2$ 遷移から Δ_2 離調された周波数($\omega_2 - \Delta_2$)でオフセットロックできる。ここで、交流電源からの信号を非線形伝達回路(NLTL)に 経由させるとノコギリ波のような波形に変換することができる。EOM に*Sin*波ではなくノ コギリ波の変調をかけるとサイドバンドの強度比に非対称性が生じる[4]。非対称性により、 図 5 のように余分な成分を抑え $F = 1 \rightarrow F' = 2 \ge F = 2 \rightarrow F' = 2$ 遷移の強度比を1:1 に近 くすることができる。

以上のように、2本のファイバー結合型 EOM と NLTL を用いることで5 $S_{1/2}F = 1 \rightarrow$ 5 $P_{1/2}F' = 2遷移と5<math>S_{1/2}F = 2 \rightarrow 5P_{1/2}F' = 2遷移の2種類の光ポンピング光源を作成できる。$



4. 結果

4.1 オフセットロックの評価

初めに、ファイバー結合型 EOM により立たせたサイドバンドによって所望の遷移から 変調周波数分離調された値に信号が形成されるか確認する。EOM にかける変調周波数を 0~1.4GHz の範囲で 200MHz ごと変化させたときの得られた吸収信号とエラー信号を図 7,8 に載せる。



図7 観測された吸収信号

図8 観測されたエラー信号

図 8 より、 $5S_{1/2}F = 1 \rightarrow 5P_{1/2}F' = 2$ 遷移から変調周波数分離調された値にエラー信号が形成されているのが確認できる。よって、この信号を用いて ECDL にフィードバックすることでオフセット周波数を与えることができ、また、 $0\sim1.4$ GHz まで信号を観測することができたことからオフセット周波数をこの範囲で自由に可変できることが分かる。

次に飽和吸収分光法における周波数安定化の評価を行う。図 9,10 は EOM に660MHz の変調をした時の吸収信号とエラー信号である。この時、オシロスコープにより観測され た信号は $5S_{1/2}F = 1 \rightarrow 5P_{1/2}F' = 2$ 遷移を周波数軸の原点とした。



図9 変調周波数 660MHz 時の吸収信号 図10 変調周波数 660MHz 時のエラー信号 所望の遷移から660MHz 離調された図10の赤線で囲まれた信号の拡大図を図11 に載せる。 また、この信号を用いて周波数安定化した後のエラー信号を図12 に載せる。



図 11 拡大したエラー信号 図 12 周波数安定化後のエラー信号 この図より、周波数安定化後の信号は約±0.120V の振れ幅で安定していることが分かり、 拡大したエラー信号と比較し周波数範囲を見積もることで安定化した信号は約 221kHz の 振れ幅で安定していることが分かる。今回の用途として、光会合や光誘起衝突が抑制される 周波数帯は 50MHz 程範囲があるので作成した光学系とフィードバック回路による安定化 は充分にこの範囲の中に納まっていると評価できる。

4.2 サイドバンドの非対称性

ファイバー結合型 EOM に F=1,2 間の周波数差の 6.834GH z の変調を加えた時のサイド バンドをファブリペロー共振器により観測した結果を図 13 に載せる。また、図 14 は実際 に NLTL を経由しノコギリ波の信号を EOM に入力したときのサイドバンドである。



図 13 *Sin*波による変調時のサイドバンド 図 14 ノコギリ波による変調時のサイドバンド 図 13 と図 14 を見比べると+1 次と-1 次のサイドバンドに非対称性が生じていることが分 かり、サイドバンド同士の比率は約 5:3 で+1 次の方が大きく、キャリアと+1 次では約 3:2 でキャリアの強度が大きいと評価できる。今回、サイドバンドの非対称性の実験において目 標としてたキャリアと+1 次のサイドバンドの強度比を1:1 に近くすることはできなかった。

ただし、本実験では用いているファイバー結合型EOMのデータシートに14GHz 以上の 高周波における応答がどのようになっているのか確認できなかったことと、各素子のロス を正確に評価していなかったことにより、ファイバー結合型EOMが損傷しないように入 力電圧を制限して実験を行った。そのため今後、素子の一つ一つのロスを評価してからファ イバー結合型EOMへの入力電圧をあげることで、キャリアと+1次のサイドバンドの強度 比が1:1に近づくと考えている。

5. まとめと今後の展望

本研究では縮退ラマンサイドバンド冷却を行うために原子を単一の内部状態に掃き寄せる2種類の光ポンピング光源を作成することを目的にしている。また、加熱・トラップロスを抑制する離調を捜索するためにオフセット周波数をそれぞれ可変できる光学系を構築することを目指した。

実験では、周波数安定化のための光学系の作成・サーボ回路の作成を行い、オフセット ロックを行うために2本のファイバー結合型 EOM を用いた光学系を作成した。

実験の結果、所望の遷移から離調された周波数へオフセットロックさせることに成功した。また、サイドバンドの非対称性を実証し、非対称性を観測することができた。しかし、 目標としていたキャリアとサイドバンドの強度比が同等になるまで EOM に電圧をかける ことができなかった。

今後の展望として、サイドバンドの非対称性に関して素子の1つ1つのロスを評価し、 EOM への入力電圧を増加させ、キャリアとサイドバンドの強度比を1:1にし、光誘起衝 突・光会合が抑制される周波数帯を捜索し、縮退ラマンサイドバンド冷却を行っていく予 定である。参考文献

- Hu, J.Z., et al., Creation of a Bose-condensed gas of Rb-87 by laser cooling. Science, 2017. 358(6366): p. 1078-1080.
- Urvoy, A., et al., Direct Laser Cooling to Bose-Einstein Condensation in a Dipole Trap. Physical Review Letters, 2019. 122(20).
- 3. Vuletic, V., et al., Degenerate Raman sideband cooling of trapped cesium atoms at very high atomic densities. Physical Review Letters, 1998. **81**(26): p. 5768-5771.
- Stocklin, F., "Relative sideband amplitudes versus modulation index for common functions using frequency and phase modulation". [for design and testing of communication system]. 1973.