420nm 光源での EOM による

GHz 帯オフセットロックに関する研究

岸本研究室 2133017 浦川康

1. 研究の背景・目的

ボース・アインシュタイン凝縮体の生成は、いかに低温で高密度な原子集団を生成でき るかが重要となる。⁸⁷Rb原子のレーザー冷却では、一般的に閉じた5*S*_{1/2} – 5*P*_{3/2}遷移が用 いられてきたが、近年、アルカリ原子のnS – (n + 1)P遷移を用いた決線幅遷移を用いた冷 却が他の研究グループから報告されており、より低温度かつ高密度の達成が見込まれる [1]。しかしながら、高密度化には限界があり、光会合という原子集団に光が入射すること で分子が生成する現象により冷却から離脱、加熱が生じてしまう。光会合には周波数依存 性があることが分かっていることから、現在これらの遷移近傍での光会合分光測定を行 い、どの周波数において光会合が発生するかを特定することを目指している。また、光会 合を防ぐためには、冷却光の周波数を GHz 程度離すことが望まれる。このような光源を 用意する方法として、本研究では、EOM(電気光学変調器)を用いた GHz 帯の周波数オ フセットロック制御の実現を目的としている。

図1のように、レーザー光の一部を分け、EOM に透過させ現れたサイドバントの一つ を用い、レーザーの周波数を原子遷移へ安定化することで、キャリア成分も一定周波数差 をつけた状態で周波数が安定化できる。この手法を用いることで、他のサイドバンド周波 数成分を乗せずに共鳴遷移から用途に応じた離調をとった、波長が安定化されたレーザー 光源が得られる。このことから、EOM を透過し、現れるサイドバンドの離調を GHz に し、ロックに用いれば、GHz 帯のオフセットロックの実現につながる。ただ、実際には、 効率的に GHz の1次サイドバンドを得ることは難しいため、今回、数百 MHz 程度の周波 数でサイドバンド生成を試み、その位相変調度の増強を行うことで、高次のサイドバンド 生成し、将来的にその高次サイドバンド成分を用いて原子遷移への安定化を行うことで、 GHz オフセットロック制御を目指すこととした。



2. EOM の概要

EOM は、電気光学効果を持つ強誘電体結晶である。電気光学効果とは、外部印加電圧 により、屈折率が変化するものである。この性質により、結晶に交流電圧を印加し、屈折 率を変化させ、レーザー光を通すことで、レーザー光の位相、周波数を変調させることが できる。変調されたレーザー光は元々の周波数 ω_c の他に、サイドバンドと呼ばれる成分 $\omega_c \pm n\omega_m$ が形成される。高次のサイドバンドを用い、周波数ロックを行うことができれ ば、さらに離れた離調をとることができる[2]



図3は、EOM の位相が π シフトするために必要な電圧 V π を表しており、入射光の 波長が短いほど、必要な電圧が低いことが分かる。また、図4は、n次のサイドバンドの 強度を表しており、位相をどれくらいシフトするかにより、何次のサイドバンドが強く現 れるかが変わってくることが分かる。[2] 今回の実験の目的では、できるだけ離調をとり たいため、EOM に印加する電圧の周波数を高くする、または、高次のサイドバンドを用 いるため、高い電圧をかける必要がある。尚、本実験では、波長 420nm 近辺での分光用 途に用いる光源作成を行うため、電圧V_πが小さくなるメリットを利用できるが、研究開始 時点で近赤外領域に用いるような導波路型の EOM が青色波長域で存在しないため、自由 空間型の共振型 EOM を作成することとした。



図 3 EOM でπ位相変調するために 必要な電圧[2]



図 4 n 次サイドバンドの強度[2]

3. 共振回路

3.1 共振回路の開発

EOM の周波数変調を効率的に行うためには、大きな電圧が必要となる。そのために、 共振回路の構造を用いる。EOM は電子回路上で、コンデンサとして扱え、EOM を共振回 路に組み込むことで、実行的に大きな電圧をかけることができる。数百 MHz 以上の周波 数帯において、共振回路の Q 値は著しく下がり、十分な電圧がかけられないため、共振周 波数とかけられる電圧の兼ね合いで、共振周波数が約 250MHz で設計した [3]。



図 5 設計した共振回路

図 6 製作した共振回路

3.2 共振周波数測定

回路が共振状態である時に、作成した共振回路は、計算上インピーダンスが減少する。 これを用いて、RFスペクトラムアナライザからのトラッキングジェネレータの出力を共 振回路に送り、方向性結合器を用いて取り出した反射波をスペクトラムアナライザで測定 する。共振が起きている周波数では、反射波の強度が下がるため、そこの周波数を共振周 波数として求めることができる。 この手順により、作成した共振回路の共振周波数を測 定した。この結果から読み取ると、共振の中心周波数fは255.1MHz、半値全幅Δfは、 10.8MHz であり、したがって共振回路のQ 値は23.62 と求まった。



図 7 共振周波数測定の原理



図 8 スペクトラムアナライザを用いた 共振周波数測定結果

コメントの追加 [岸本1]: 今更ですが、確認させてください・・・
Cとか L で見積もる値は、ω?f?。信号発生器はf?
⇒この辺の整合性は大丈夫?
⇒ここの文章中での表記は、ω?f?

4. 実験結果

4.1 光学系

EOM に透過したレーザーを、ファブリペロー共振器で検出し、その出力をオシロスコ ープに接続して、変調光のスペクトル測定を行う。使用したファンクションジェネレータ の最大電圧 13dBm であったので、この用途に利用するためには、さらに強い信号パワー が必要である。その解決策として、図 10 のように増幅器をファンクションジェネレータ と EOM の間に挿入した。また、今回の実験では、作成した EOM によって位相変調した 光を用い、*Rb*の吸収量を測定するため、変調光を PBS で分割し、飽和吸収の系に入射さ せ、フォトディテクターを用い測定を行う。



4.2 サイドバンドの周波数測定

使用したファブリーペロー干渉計の自由スペクトル範囲(FSR)は(f) = 1GHzである。また、キャリアのピーク間のスキャン時間(FSR)を測定すると、(t) = 4.0msであった。[図 11]

時間間隔と周波数間隔は対応しているので、 $\frac{\Delta t}{FSR(t)} = \frac{\Delta f}{FSR(f)}$ より、サイドバンドが立つ周波数を求めることができる。





図 11 直接測定したスペクトル

図 12 EOM により変調したスペクトル

図 12 はレーザー光を EOM により変調を行った結果であり、回路の共振測定の結果よ り、270MHz の交流電圧を印加し、最も高次のサイドバンドが確認できた時のスペクトル である。このグラフより、5 次のサイドバンドまで確認することができ、時間間隔よりサ イドバンドの立つ周波数を求め、4 次のサイドバンドで印加電圧の周波数の4 倍である 1080MHz であることが確認できた。

4.3 マスター光の評価

この光学系においてマスター光源の飽和吸収信号の評価をおこなった。通常Rb原子は⁸⁵Rb と⁸⁷Rbの混在しているが、今回は⁸⁵Rbのみを封入したセルを飽和吸収信号の確認に用い る。まずは EOM に変調を加えず、レーザーをセルに透過させフォトディテクターで飽和 吸収信号を得た。また図 14 は⁸⁵Rb原子の5S – 6P遷移のエネルギー準位図である。[4]



図 13 より、⁸⁵*Rb*原子の5 $S_{1/2} - 6P_{1/2}$ 遷移における $F = 2 \ge F = 3$ の吸収線の山が見てとれる。5 $S_{1/2}F = 2 \ge F = 3$ の周波数差が3.0357*GHz*であることから、モードホップフリーレンジは3.6054*GHz*であることが分かった。また、それぞれの山にはディップが3つずつ見えており、この両端の2つは $6P_{1/2}F = 2 \ge F = 3$ のそれぞれの準位によるものあり、速度0の原子に対しては、pump光により大きく吸収されてしまい、probe光の透過高強度が高まるため、このようにディップが生じる。また、中心に見えるディップはクロスオーバーと呼ばれるもので、両準位の丁度中央の周波数の光を入射した時、pump光と probe光で $6P_{1/2}F = 2 \ge F = 3$ へ遷移するための原子の速度が一致してしいるため生じるものである。

4.4 変調光の評価

3.1 節で作成した共振回路に組み込んだ EOM を用いて、レーザー光を位相変調、サイドバンを立たせ、 $5S_{1/2} F = 2 - 6P_{1/2}F = 2, F = 3$ とクロスオーバーの吸収信号を得た結果が図 15 である。また、その際の周波数変調スペクトルが図 16 である。

コメントの追加 [岸本2]:

図14がもう少し大きく見えるようにできますでしょうか?



図 15 変調光を用いたディップ

図 16 飽和吸収信号を得た際のスペクトル

EOM に電圧をかけ過ぎてしまうと吸収線全体がフラットになりディップが見れなくな るため、4次のサイドバンドが立つ程度の変調を加えた。[図 16]結果としては、4次のサ イドバンドで GHz の離調をとっているいるにもかかわらず、540MHz の位置までにしか ディップを観測することができなかった。やはり、高次のサイドバンドによるディップ は、ディップを構成する光自体が少なくなってしまうのが原因だと考える。また、吸収線 を観測する上でも、サイドバンドの立たせる周波数を高め、他のサイドバンドの吸収線の 影響を受けずに測定する必要がある。

5. まとめと今後の展望

光会合には周波数依存性があることが分かっており、冷却光の周波数を GHz 程度離す ことが望まれる。このような光源を用意する方法として、数百 MHz 程度の周波数でサイ ドバンド生成を試み、共振回路により位相変調度の増強を行うことで、高次のサイドバン ド生成し、GHz オフセットロック制御を目指した。サイドバンドを用いロックを行うため には、より高次のサイドバンドによる飽和吸収信号のディップを高める必要がある。

今後の展望として、変調電圧が小さい非共鳴同波路型の EOM が可視の領域で手に入る ようになっているため、それを用いてより効率的に実験を行い光会合周波数の特定を行 い、今回の研究を GHz 以上の固定オフセット周波数で活用したい。

参考文献.

- P. M. Duarte, R. A. Hart, J. M. Hitchcock, T. A. Corcovilos, T. -L. Yang, A. Reed, and R. G. Hulet, "All-optical production of a lithium quantum gas using narrow-line laser cooling", Phys. Rev. A 84, 061406(R) (2011).
- [2] THORLABS 「EO 変調器」thorlabs.co.jp/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=2729
- [3] 理化学研究所 藤澤高志 高周波回路の負荷整合 (2017)
- [4] C. Glaser et al. Absolute frequency measurement of rubidium 5s-6p transitions. Phys. Rev. A, 102, 012804, (2020)