

GHz 帯オフセットロックに向けた

EOM による位相変調度の増強に関する研究

岸本研究室 1710096 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。その際、実験では波長が安定化された狭線幅のレーザー光源が必要となる。また、原子レーザーの冷却に限らず、分光実験、原子干渉計など、さまざまな実験においては、原子の共鳴遷移から

用途に応じた離調に波長を安定化する必要がある、GHz オーダーのオフセット周波数が要求されることも多い。このような光源を用意する方法として、いくつかの方法が考えられるが、本研究は、EOM（電気光学変調器）を用いた GHz 帯のオフセットロック制御の実現が目的である。

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ドの一つを用い、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

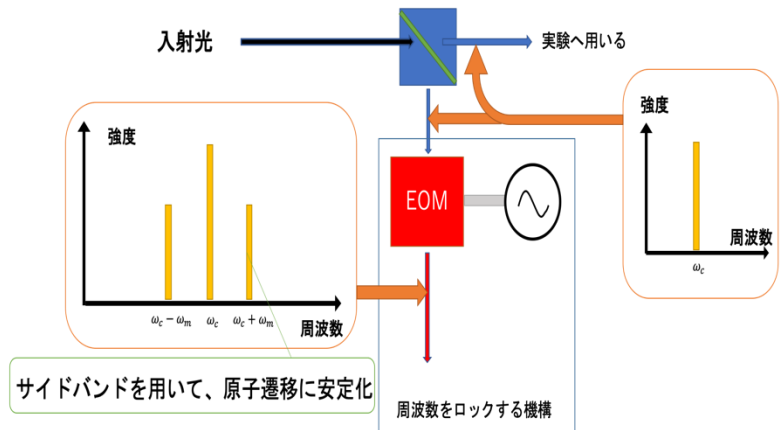


図1 サイドバンドを用いた周波数ロック

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[1]

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なるかが変わってくる。[1] 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、近赤外領域で用いるような inline 型のファイバ 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。

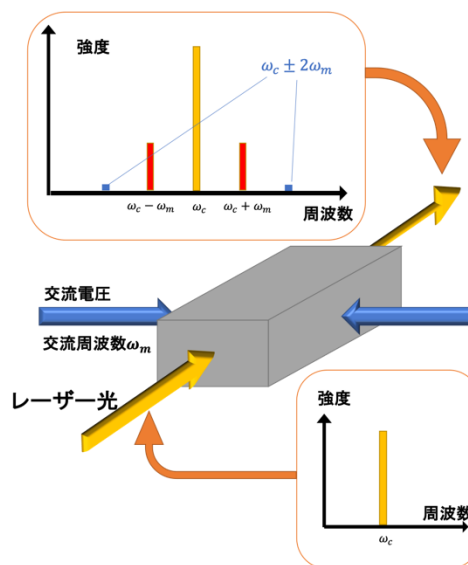


図2 EOMを用いた周波数変調

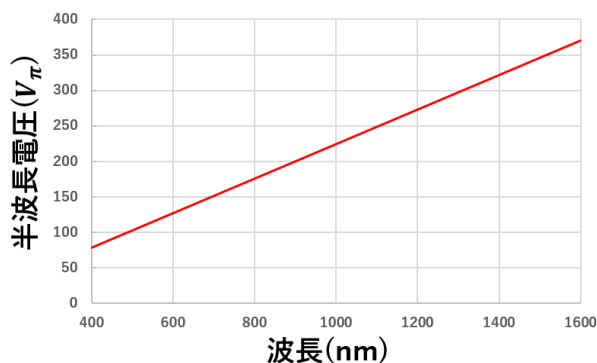


図3 EOMで π 位相変調するために必要な電圧[1]

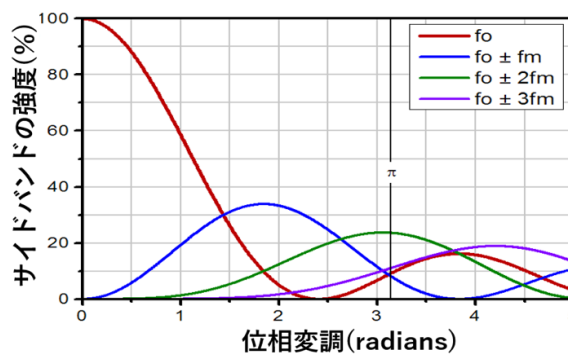


図4 n次サイドバンドの強度[1]

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

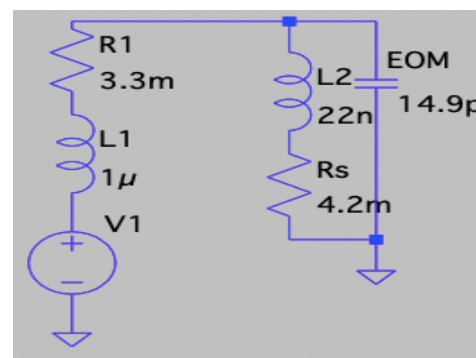


図5 作成した共振回路

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 280MHz で設計した[2]。

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 ω は 329.1MHz、半値全幅 $\Delta\omega$ は、13.5MHz と求まった。

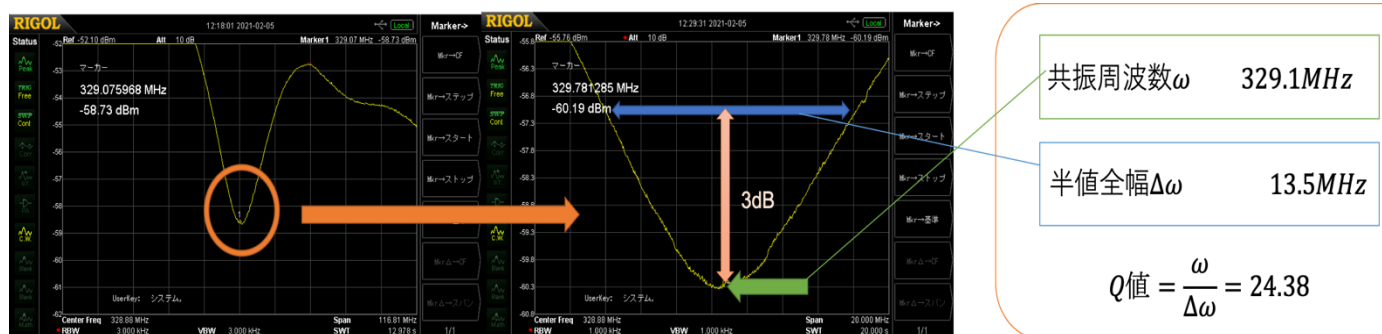


図 6 スペクトラムアナライザを用いた共振周波数測定結果

5. サイドバンドの観測

5.1 光学系

EOM に波長 420nm のレーザーを透過させ、サイドバンドを観測するために、図 7 の光学系を用いた。EOM に透過したレーザーを、ファブリー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った。使用したファンクションジェネレータの最大電圧 13dBmW 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り、増幅器を挿入

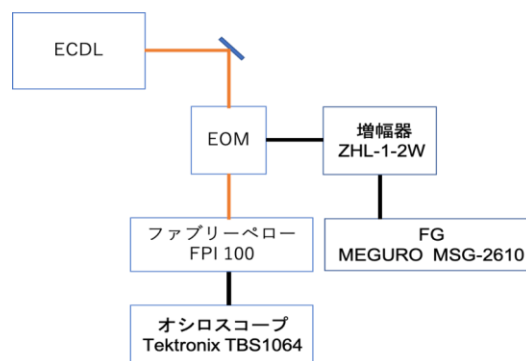


図 7 サイドバンドを観測するための光学系

5.2 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。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8は、EOMにレーザー光を透過させ、得られたスペクトルである。1次、2次のサイドバンドが立つ周波数を求めると、316MHz、632MHzであった。この周波数はスペクトラムアナライザで測定した329MHzと少し誤差があるが、浮遊インダクタンスの影響を受けていると考えられる。また、キャリアと1次サイドバンド、2次サイドバンドの強度の比は、オシロス

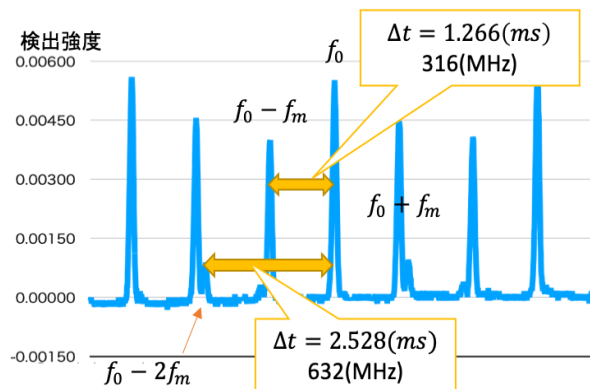


図8 EOMにレーザーを透過させ得られたスペクトル
 コープで得た測定値より、約1:0.8:0.16であったため、変調度は図4より、1.3ラジアンであると見積もれ、EOMにかかる電圧は33.1Vと求められた。今回のEOMに印加する電圧の周波数は約300MHzであり、今後、高次のサイドバンドを立たせるには、さらに印加電圧を増強するために回路を改善し、変調度の増強が必要となる。今回、おおよそ原理どおりの位置にサイドバンドが得られたことにより、さらにEOMに印加できる交流電圧と周波数を高めることができれば、GHz以上の変調を実現できると考える。

6. まとめと今後の展望

今回の研究では、EOMに高電圧を印加するための共振回路の開発を行い、レーザーを透過させサイドバンドが現れることを確認した。得られたスペクトルより、さらに高次のサイドバンドを得るにはEOMに印加できた電圧が不十分であり、さらにEOMに印加する電圧、周波数の調整が必要であることが分かった。

今後の展望としては、さらにEOMに高電圧、高周波数をかけられるように回路を改善していく。また、マルチパス[3]によって、EOMに複数回レーザー光を透過させることで、位相変調度の増強を行いたいと考えており、将来的には、共振回路の共振周波数を可変にできるかも検討していきたい。

参考文献

- [1] THORLABS 「EO 変調器」 thorlabs.co.jp/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=2729
- [2] 理化学研究所 藤澤高志 高周波回路の負荷整合 (2017)
- [3] Thomas R. Mazur Magnetically Activated and Guided Isotope Separation(2015)