

レーザー周波数安定化のための共振型電気光学変調器の試作

岸本研究室 1424026 春日研

1 背景と目的

岸本研究室では、 ^{87}Rb の原子気体を用いたレーザー冷却に関する実験研究を行っている。高速で運動する気体原子を効率よく冷却するためには、照射するレーザーの周波数を原子の遷移周波数に精度良く定め、かつ定めた周波数をその値に安定して保つ必要がある。この要請を満たすために、レーザーの周波数を必要な値に安定して定める(ロックする)機構を用いるのであるが、その際レーザーの周波数が原子に共鳴な値になっているかを測定・判別してレーザーの周波数をロックし、かつその後ロックが外れないようにフィードバックを掛ける必要がある。これらを行うための信号を生成するために、レーザーの周波数を変調させることを目的として、電気光学変調器(EOM)を用いる。

2 共振型電気光学変調器の概要

2.1 ニオブ酸リチウムについて

今回の実験で製作した EOM は、ニオブ酸リチウム(LiNbO_3)の結晶を用いている。この結晶は電気光学効果を示す結晶であり、電界を印加することによって屈折率が変化する性質を持つ。この性質を利用して、結晶に交流電圧を印加することでその屈折率を周期的に変化させ、そこへ結晶の光学軸方向に偏光したレーザー光を通すことでレーザー光の位相を変調させることができ、したがってレーザー光の周波数を変調させることができる[1]。周波数 ω_s で変調されたレーザー光はももとの周波数(キャリア周波数) ω_0 の他に、サイドバンドと呼ばれる周波数成分 $\omega_0 \pm \omega_s$, $\omega_0 \pm 2\omega_s$, ... も持つ。(図 1)これらのキャリアおよびサイドバンドを利用してレーザーの周波数ロック及びフィードバックを行う信号を生成することができる。

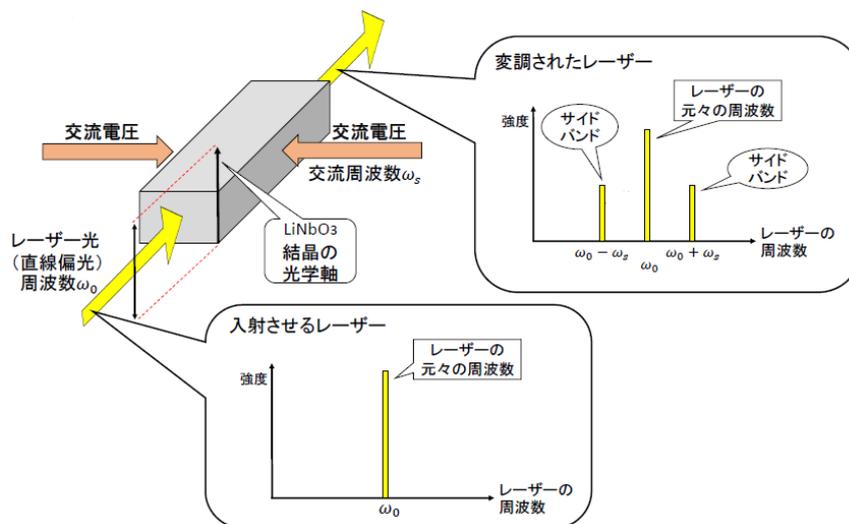


図 1 ニオブ酸リチウムを用いたレーザーの周波数変調

2.2 共振型について

ニオブ酸リチウムを用いて周波数変調を効率的に行うには大電圧を要するため、共振回路の構造を用いる。上述の結晶を金属端子で挟み、これをコンデンサとして扱い、インダクタと直列の共振回路を組む。この回路を共振状態にして用いることで、コンデンサである結晶部分に実効的に大電圧をかけることができる。

3 共振型電気光学変調器の製作[2]

3.1 共振回路について

今回製作する EOM を使用する波長安定化方法において、 ^{87}Rb の冷却に使用する遷移の線幅(自然幅)である 5.75MHz 程度の変調が必要であったため、サイドバンドとキャリアとの周波数の差がこの値にできる限り近い変調を行う EOM の製作を目指す。

また、共振型として製作する際に、回路に印加する交流電源の周波数は、変調を行った際のキャリア周波数とサイドバンド周波数との差に等しくするため、共振の中心周波数が 5.75MHz に近くなることを目指した。さらに、回路を共振させた際に、コンデンサに掛かる電圧値を可能な限り大きくするために、回路内の抵抗成分を可能な限り小さくするように製作する。

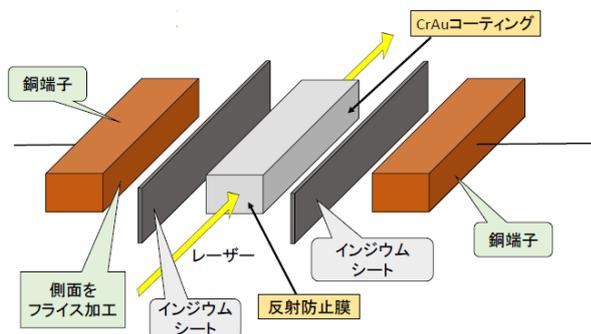
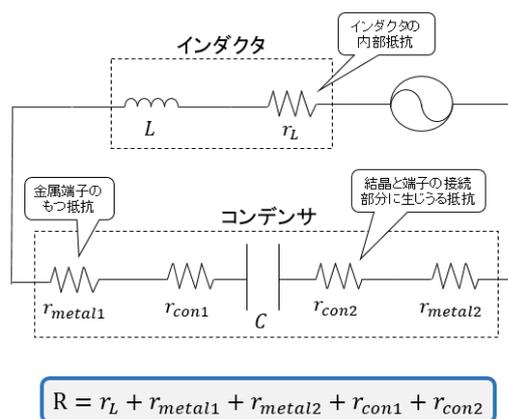


図 2 は EOM の等価回路図である。図にあるように、抵抗成分としては用いるインダクタの内部抵抗、用いる金属端子自体の抵抗、金属端子と結晶との接触部分に生じる実質的な抵抗成分があり、これらはすべてコンデンサに印加する電圧値を下げる原因となる。これを軽減するために、概略図(図 3)のように金属端子には導電率の高い、即ち抵抗値の小さい銅を用い、また結晶との接触面をフライス加工によって滑らかにする。更に金属端子と結晶との接触面積を増やし、抵抗成分を下げるために、間に柔らかい In シート(インジウムシート)を挟む。インジウムシートそれ自体は決して電気抵抗値は小さくないが、 $100\mu\text{m}$ までの銅端子面の凹凸を緩和できるため、接触面積の増加による抵抗値の低下を狙うことができる。なお結晶側の接触面には Cr Au(クロム金)コーティングを施したものをを用い、端子としての導電率を上げる。

3.2 インダクタの選定について

今回製作する共振型 EOM で使用するインダクタは既製品のものをを用いる。

選定の際の繰り返し作業中に結晶を傷つけたり、汚したりしてしまうことを防ぐため、今回はまず結晶と同程度のキャパシタンスを持つコンデンサを用いて候補となるインダクタの選定作業を行った。スペクトルアナライザを用いて、インピーダンス整合による反射波のパワーロス走査してモニタリングする(図 4)ことで、共振の中心周波数および共振の帯域(半値全幅)をそれぞれ求めた。

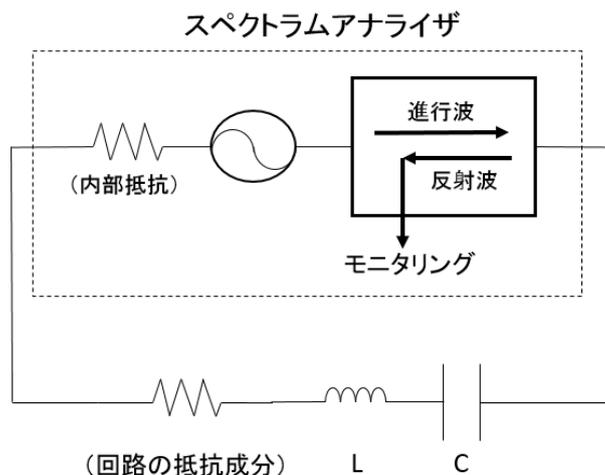


図 4 インダクタの選定を行う回路

予め測定しておいた結晶のキャパシタンスは $30\sim 50\text{pF}$ 程度であったため、コンデンサとして 33pF , 47pF のものを用い、 5.75MHz にて共振する条件からインダクタは $15\sim 25\mu\text{H}$ と見積もった。この範囲内の候補として汎用品から $10\mu\text{H}$, $22\mu\text{H}$, $47\mu\text{H}$ のものを取り上げ、共振周波数と Q 値を測定し、共振周波数が 5.75MHz に近く、内部抵抗が小さく共振の Q 値が大きいものを選別し、用いるインダクタは $47\mu\text{H}$ のものと決定した。

4 EOM の測定結果

結晶を用いたコンデンサを作製し、3.2 で選定したインダクタを実装した共振型電気光学変調器の実際の写真が図 5 である。

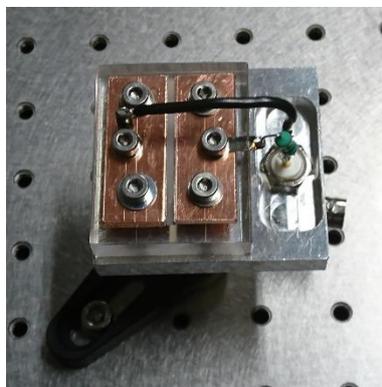


図 5 実験に使用した共振型電気光学変調器

この共振型電気光学変調器を、3.2 のインダクタの選定と同様の方法でスペクトラムアナライザによって測定し、図 6 のようなグラフ特性を得た。

このグラフデータから読み取ると、この EOM の共振の中心周波数は 4.96MHz、帯域幅(半値全幅)は 30.3kHz であって、したがって共振の Q 値は 164 であった。

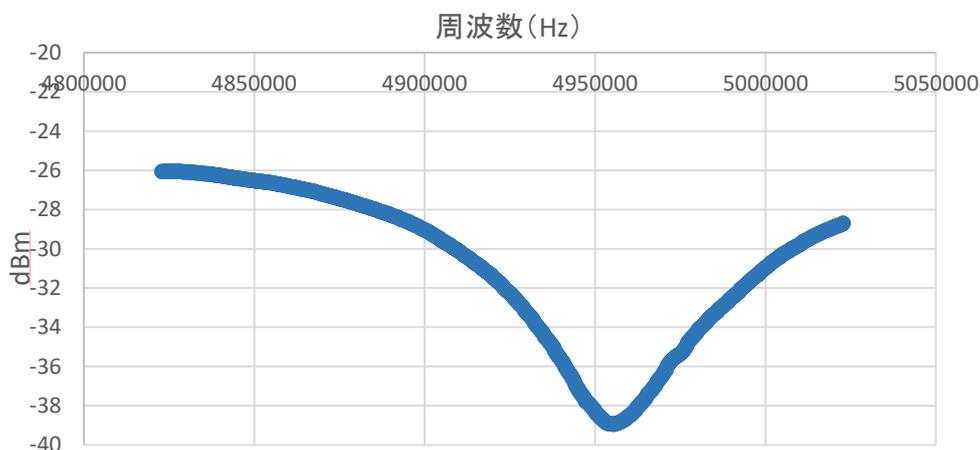


図 6 共振型電気光学変調器の特性評価

5 まとめと今後の展望

5.1 まとめ

- ・ニオブ酸リチウムの結晶を用いて、共振型電気光学変調器を試作した。
- ・試作した共振型電気光学変調器をスペクトラムアナライザによって測定したところ、共振の中心周波数は 4.96MHz、帯域幅(半値全幅)は 30.3kHz、共振の Q 値は 164 であった。
- ・これより共振回路全体に含まれる抵抗値を求めると、 $R=1.42\ \Omega$ であった。
- ・予め測定しておいたインダクタ($47\ \mu\text{H}$)の内部抵抗は $1.05\ \Omega$ であって、上述した回路全体に含まれる抵抗値との差は $0.37\ \Omega$ であるので、組み上げる際の接触抵抗等の付加的な内部抵抗は小さく抑えることができたと考えられる。

5.2 今後の展望

今後は得られた Q 値からコンデンサにかかる交流電圧の大きさとそこから得られるキャリア・サイドバンドの比を見積もりたい。また、実際に EOM にレーザー光を通し、サイドバンドを生成させることを通じて、上記の結果から得られた値と照らし合わせ、その後、波長安定化の機構に組み込む予定である。

6 参考文献

- [1]D. J. McCarron, S. A. King and S. L. Cornish, Meas. Sci. Technol. 19, 105601 (2008).
- [2]南谷優吾, ”光注入同期された半導体レーザーの同期周波数範囲の拡大方法に関する研究”,平成 25 年度卒論.