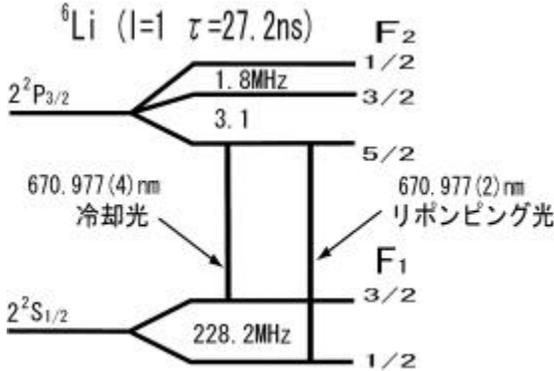


⁶Li のトラップに使用するための電気光学変調器の製作

電子物性工学科 清水和子研究室 辻井 宏和

⁶Li のトラップには $2^2S_{1/2}(F_1=3/2)$ と $2^2P_{3/2}(F_2=5/2)$ の間の遷移を用いています。



リチウム6のエネルギー準位

クーリングの際に $2^2P_{3/2}(F_2=5/2)$ と、 $2^2P_{3/2}(F_2=3/2)$ と、 $2^2P_{3/2}(F_2=1/2)$ の間のエネルギー準位が近いために

それぞれの自然幅が重なり合っ
て $2^2P_{3/2}(F_2=5/2)$ だけに遷移せず他の準位にも遷移してしてしまう原子もあります。
 $2^2P_{3/2}(F_2=3/2)$ 、 $2^2P_{3/2}(F_2=1/2)$ の準位の原子は $2^2S_{1/2}(F_1=3/2)$ の準位の他に $2^2S_{1/2}(F_1=1/2)$ にも落ちることがあります。

$2^2S_{1/2}(F_1=1/2)$ の準位に落ちた原子は

$2^2S_{1/2}(F_1=3/2)$ の準位と 228MHz の差があり、冷却光の周波数の光では励起されないため、この準位にいる原子を別の周波数の光でリポンピングして上の準位の $2^2P_{3/2}(F_2=3/2)$ にあげる必要があります。

冷却光を変調して、そのリポンピングに必要な周波数の光を発生させる電気光学変調器 (EOM) の製作が目的です。

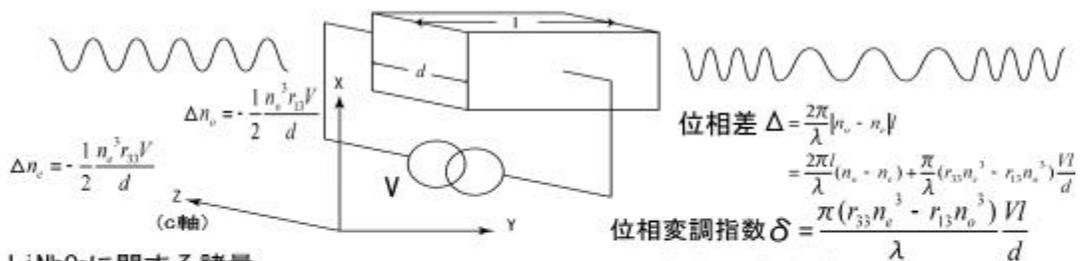
この図は EOM の原理です。

電圧をかけると、屈折率の変化が電圧に比例することを一次電気光学効果といいます。EOM にはこの一次電気光学効果をの大きい LiNbO_3 の結晶を使いました。

この図のように結晶の両端に電圧をかけ光を通すと位相変調が得られます。

位相差は電圧によって変化することがわかります。電圧に比例する項を位相変調指数 () と言い、どのくらい電圧をかけると、どのくらい位相が変化するかを表しています。

電気光学変調器 (EOM) の原理



LiNbO₃に関する諸量

電気光学係数

$$r_{33} = 30.8$$

$$r_{13} = 8.6$$

$$r_{22} = 3.4$$

$$r_{42} = 28$$

[10⁻¹²mV]

屈折率

$$n_o = 2.287$$

$$n_e = 2.202$$

誘電率 (ϵ/ϵ_0)

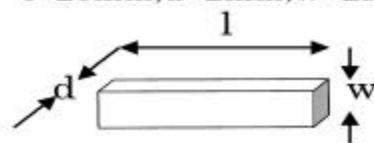
$$\epsilon // c = 50$$

半波長電圧

$$V_{\pi} = 282 \text{ [V]}$$

結晶の大きさ

$$l = 20 \text{ mm}, d = 2 \text{ mm}, w = 2 \text{ mm}$$

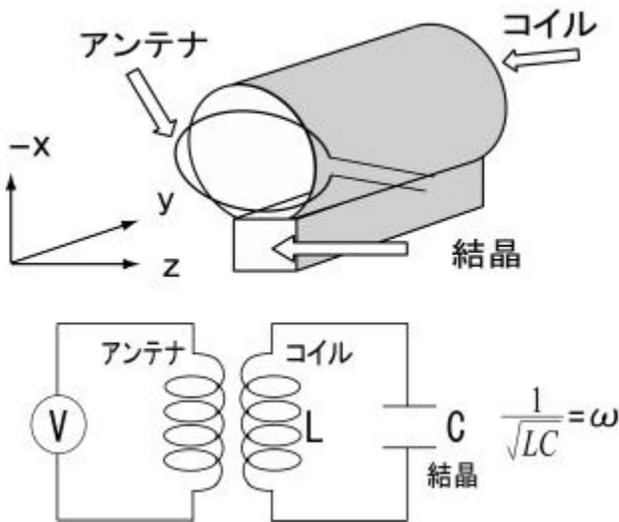


LiNbO₃の諸量は以上の通りで、電気光学係数は電圧と屈折率の変化の比例定数でこれ
 が大きいと一次電気光学効果が大きいということになります。

位相がずれる電圧、半波長電圧は282Vです。

結晶の両端に電圧をかけると、位相が変調されることを説明しましたが、実際に製作し
 た EOM は結晶に電圧をかけるのにこの図のようにしました。

電気光変調器(EOM)



これは、銅箔の電極をコイル状にして
 繋いであります。そして発振器から繋
 いだアンテナからコイルにパワーを
 入れています。これは回路図で表すと、
 図のように LC 共振回路になってい
 ます。こうして共振回路にすることで、
 結晶の両端に直接発振器から繋ぐよ
 りもずっと高い電圧を結晶の両端に
 かけることができます。

LC共振回路のLとCと共振周波数

の関係は $\frac{1}{\sqrt{LC}} = \omega$ です。

C は結晶の誘電率と大きさから決
 まり、一定なので共振周波数はL

だけできまります。

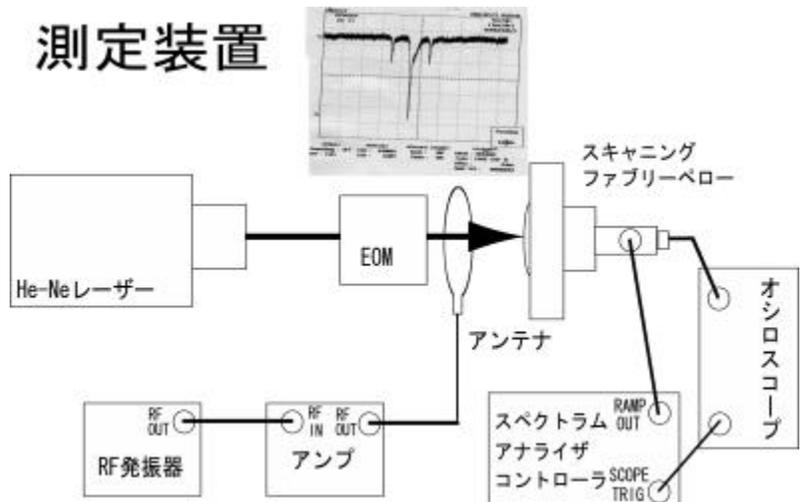
Lはコイルの巻数をnとして $L = \mu_0 n^2 l S$ なのでコイルの面積Sに比例します。

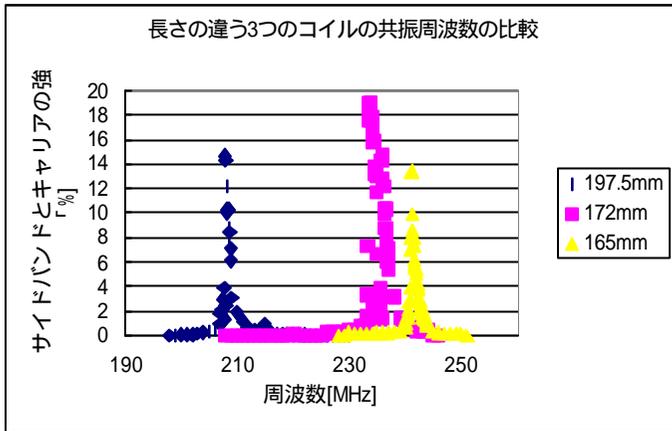
ところがコイルは銅箔で作ってあるため面積Sの測定は難しいのでコイルの面積を円と
 考えて、いくつかのコイルで円の周りの長さとの関係を調べました。

これは測定装置の図です。

RF 発振器からアンプ
 を通してアンテナに繋い
 ています。アンプは RF
 発振器の出力を+40dBm
 倍してアンプに伝えます。
 アンテナから EOM にパ
 ワーを供給します。EOM
 を通った光はスキャン
 ングファブリーペローを
 用いてオシロスコープで観
 測します。この図はサイ
 ドバンドとキャリアのス
 ペクトルをオシロスコープ
 でみたものです。真ん中の山がもとの周波数スペクトルで左右
 の山が変調された光のスペクトルです。

測定装置





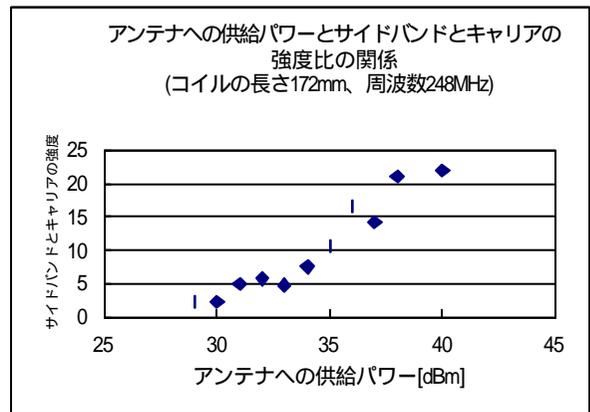
これは長さの違う3つのコイルでの共振周波数の比較です。縦軸がサイドバンドとキャリアの強度比になっています。コイルの長さが短いほど、つまりコイルの作る面積が小さい、L が小さいほど共振周波数が高くなっているのがわかります。

このことから、同じコイルでもコイルを変形させてコイルの作る面積を変えて周波数を変えられることがわかります。そして

でこれからは、長さが 172mm のコイルを使うことにしました。

つぎのグラフは長さが 172mm のコイルで周波数を 248MHz で固定してアンテナに供給するパワーを変えて、サイドバンドとキャリアの強度比を測定したものです。

この範囲ではパワーを加えるほどサイドバンドとキャリアの強度比が高くなっているのがわかります。



次は測定した結果からスペクトル線の鋭さを表す指標 Q 値を求め、共振回路を用いた場合と、直接結晶に電圧をかけた場合の結晶にかかっている電圧 V を比較するものです。

Q 値からコンデンサーにかかっている電圧 V を見積もることができます。

例としてコイルの周の長さ 172mm

共振周波数 $[1/\text{rad}]=2 \times 233[\text{MHz}]$

半値半幅 $[1/\text{rad}]=2 \times 1.4[\text{MHz}]$

$$Q = \frac{w}{2g} = \frac{2p \times 233 \times 10^6}{2 \times 2p \times 1.4 \times 10^6} = 83.4$$

コンデンサの電気容量 $C=8.85 \times 10^{-12}[\text{F}]$

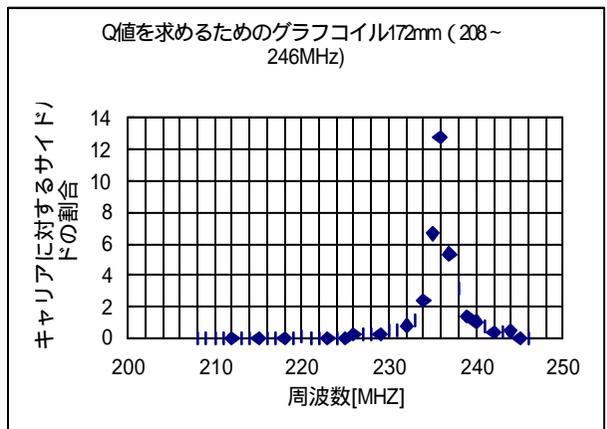
加えるパワーを $P=10^{35/10}=3.1[\text{W}]$ とするとコンデンサ間に貯えられるエネルギー E は

$$E = \frac{1}{2}CV^2 \quad \text{より} \quad \frac{E}{w} = P \quad \text{から}$$

V を求めると

$V = 200[\text{V}]$ となります。

共振回路にしないで直接コンデンサにアンプから電圧をかけた場合は $\frac{V^2}{R} = 2P$ より 3.1W

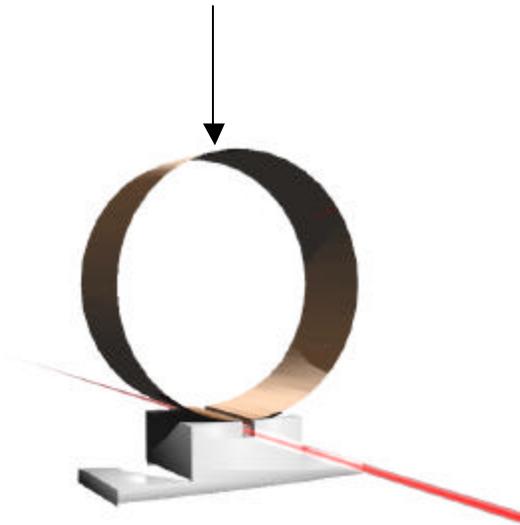


加えると $R=50$ として

$V=18[V]$ となります。

よって共振回路にすると直接繋げるより約 10 倍高い電圧をかけることができます。

下図は製作した EOM の概略図です。



まとめ

図の矢印の方向にコイルを押し変形させ、 $230 \sim 250\text{MHz}$ の間で共振周波数を連続的に可変できる EOM を製作しました。

キャリアとサイドバンドの強度比は 231MHz 、 $37\text{dBm}(5\text{W})$ で 54% を達成しました。

また熱で誘電率が変化して C の値が変わっても周波数は変えずにコイルを変形させることによって共振が取れるように微調整できるようになっています。

そして、この EOM を使用して ${}^6\text{Li}$ のトラップに成功しました。