

単一光源からの⁸⁷Rb原子用レーザー冷却光および

リポンプ光生成に関する研究

Ⅲ類 理工学プログラム 岸本研究室

1810136 大野貴洋

1. 研究の背景・目的

原子には共鳴周波数をもつ光を吸収し放出する性質がある。原子の運動方向と対向する光を吸収すると、原子は運動量を受け取って減速し、冷却されるが、逆に、同方向の光により加速し、加熱されることも考えられる。この冷却と加熱のつり合いが取れる温度まで冷却が行われ、レーザー冷却に利用されている。

図1に⁸⁷Rbのエネルギー準位図を示す。

ここで、 F, F' はそれぞれ基底状態、励起状態

における原子の全角運動量の量子数である。 $F' = 3$ からの自然放出による緩和先が遷移選択則 $\Delta F = 0, \pm 1$ より $F = 2$ のみであることから、レーザー冷却光は $F = 2 \rightarrow F' = 3$ の遷移を用いるが、運動している原子に対してレーザー光の周波数を原子の共鳴周波数に合わせるため、ドップラー効果による周波数シフトを考慮して共鳴周波数から少し負に離調させる。また、原子には自然幅があるため、レーザー冷却光によってわずかながら $F' = 2$ の状態へ励起してしまう原子も現れる。基底状態の原子が光を吸収して励起状態になった後、励起状態に存在する原子が光を自然放出して基底状態に緩和することを考えると、遷移選択則により、 $F' = 3$ に存在する原子は $F = 2$ のみに光を自然放出して緩和し、 $F' = 2$ に存在する原子は $F = 1$ と 2 に光を自然放出して緩和する。こうしてレーザー冷却のサイクルが繰り返されるうちにほとんどの原子は $F = 1$ の状態に存在するようになってしまい、冷却サイクルから外れてしまうので、それ以上レーザー冷却光によって冷却することができなくなってしまう。そこで、リポンプ光により $F = 1 \rightarrow F' = 2$ の遷移をさせることで、その原子は基底状態の $F = 2$ と $F = 1$ のどちらにも緩和するが、リポンプ光を当て続けることで冷却サイクルは閉じ、冷却し続けることが可能となる。

このように⁸⁷Rb原子気体でレーザー冷却を行うにはレーザー冷却光の他に6.8GHz離調されたリポンプ光が必要となる。しかし、レーザー冷却光とリポンプ光でそれぞれ波長が異なるため、一般的に、光源に用いる外部共振器型半導体レーザーが2つ必要だが、コストや労力が相当かかる。そのため、本研究では、⁸⁷Rb原子気体の5S-5P冷却遷移用として

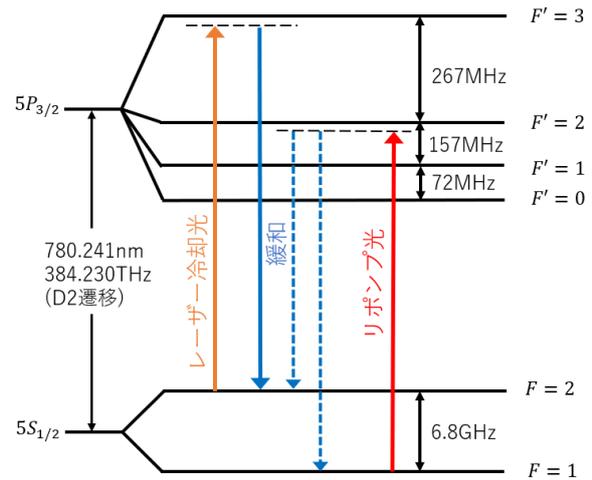


図1 ⁸⁷Rbのエネルギー準位図[1]

波長 780nm において、単一の光源で、使用する外部共振器型半導体レーザーのキャリアから 3.4GHz の離調をとった±1 次のサイドバンドを、それぞれレーザー冷却光とリポンプ光に利用することを目指すことにした。

2. 外部共振器型半導体レーザー

本実験では、先行研究[2][3]により作成された外部共振器型半導体レーザー(External Cavity Diode Laser, ECDL)を光源として用いており、体積型ホログラフィック回折格子(Volume Holographic Grating, VHG)を用いることで外部共振器構造をとっている。VHG はブラッグ角で設計波長の光のみを十数%回折し、LD へ戻す。そのため、波長選択フィルタと部分反射ミラーの役割を1つの素子で行うことができ、LD の前方に VHG を配置するだけで設計波長のコヒーレント光を発振させることができる。ECDL の実効的共振器長 L を適切に設計すると増強できるので、光速を c 、free spectral range(FSR)を $\Delta\nu_{FSR}$ とすると

$$\Delta\nu_{FSR} = \frac{c}{2L} \quad (1)$$

より、今回は 3.4GHz 間隔で共振するように L は 44mm と設計されている。

3. 3.4GHz の±1 次のサイドバンドの形成と増幅

本実験では、レーザーのキャリアに対するサイドバンドの形成の様子を確認するために、研究室で作成した FSR が 1GHz であるファブリー・ペロー共振器を用いた。

通常、電流変調の周波数が高周波の変調だとサイドバンドはキャリアに対して数%程度までしか形成されないが、本実験では、レーザーの駆動電流にマイクロ波周波数変調をかけ、外部共振器長を調整することで、発生するサイドバンドの増強を行った。しかし、マイクロ波信号発生器の信号からだけでは信号強度が不足してサイドバンドが確認できなかったため、図 3 のように、マイクロ波増幅器を追加した。結果、図 4 のように、キャリアに対して約 48%程度の 3.4GHz の±1 次のサイドバンドが立つことを確認した。この時点で、マイクロ波源の入

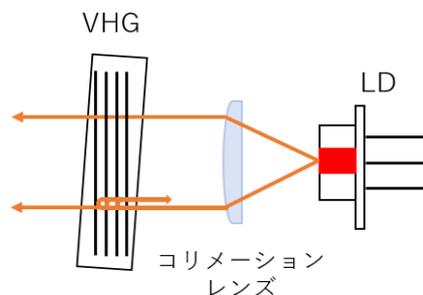


図 2 使用した ECDL の構造

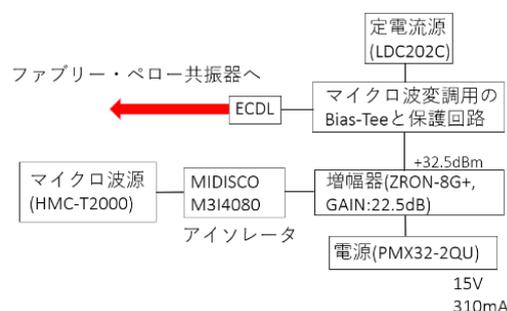


図 3 光学系

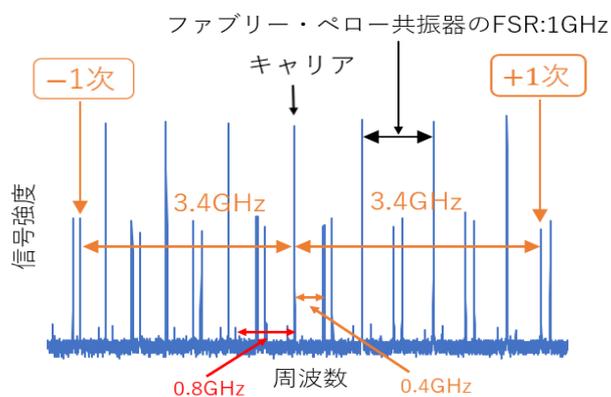


図 4 増幅器を追加しサイドバンドを増強した様子

力強度(dBm)は増幅器のスペックシートの入力強度の上限値(+10.0dBm)となっている。そして、3.4GHzの倍波である6.8GHzの2次のサイドバンドもキャリアに対して数%程度確認したが、本実験では周波数が大きく離れているため影響を及ぼすことはないと考えている。

また、増幅器とマイクロ波源の間にあるアイソレータおよびマイクロ波変調用のBias-Teeのゲインのロスを見積もると約3dBだったので、さらに+13.0dBmまで増幅を行った。増幅した結果を比較すると図5で示されるようにキャリアに対するサイドバンドの比率は約7%向上した。

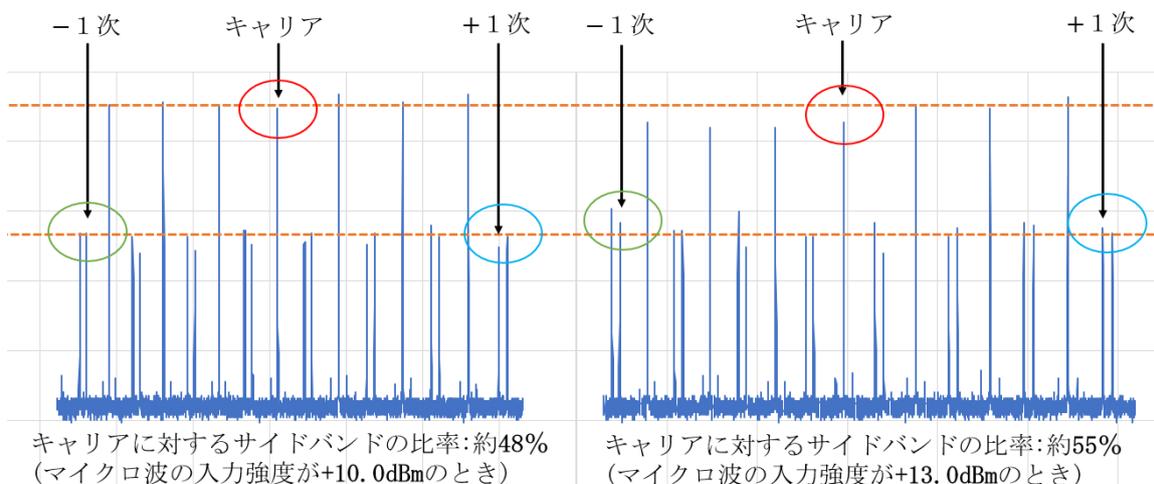


図5 キャリアとサイドバンドの振幅の変化の比較

図5のキャリアに対するサイドバンドの比率が約48%のときと約55%の時に、キャリアとサイドバンドの振幅の大きさをそれぞれ比較すると、キャリアの振幅は約6%小さくなり、サイドバンドの振幅は約9%大きくなったので、図6のベッセル関数で表されるような、キャリアとサイドバンドの振幅の増減が行われたことがわかった。

しかし、強度を3dB増やすと、3dBはおよそ1.41倍でサイドバンドの振幅は1.41倍になる計算だが、実際は1.09倍となり、1.41倍と想定した通りにはならなかった。増幅器のスペックシートの入力強度の上限値近傍で行ったことが原因として考えられた。

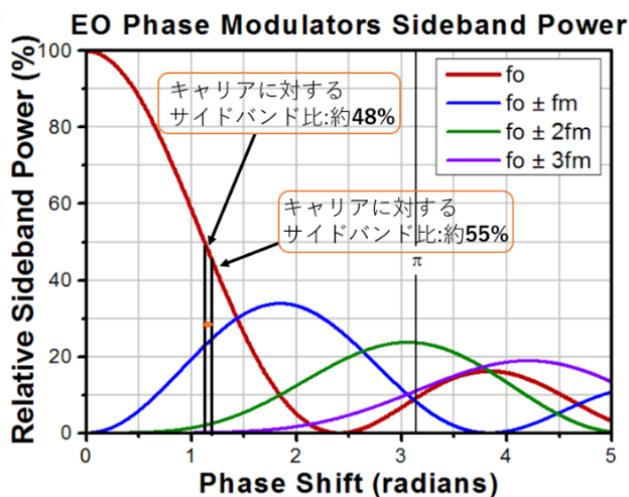


図6 位相シフトの大きさとキャリア、サイドバンドの強度の関係図[4]

4. まとめと今後の展望

今回の研究では、単一光源から ^{87}Rb 原子用のレーザー冷却光およびリポンプ光の生成を目指すために、マイクロ波を用いた 3.4GHz の電流変調および強度増強のために実効的共振器長を 3.4GHz で共振するように 44mm に調整を行った。しかし、マイクロ波信号発生器の信号からだけでは信号強度が不足していてサイドバンドが確認できなかったため、増幅器を追加し、スペックシートで示される入力強度の上限値(+10.0dBm)まで強度を入れ、キャリアに対して 48%程度のサイドバンドを確認した。また、アイソレータとマイクロ波変調用の Bias-Tee において約 3dB のロスがあったので、+3dBm のロスを考慮した増幅も行った。3dB は約 1.41 倍で、1.41 倍のサイドバンドの振幅変調を試みたつもりだが、実際には約 1.09 倍となり、想定通りとはならなかった。原因として、増幅器のスペックシートの入力強度の上限値近傍で行ったことが考えられた。

今後の展望としては、マイクロ波源の入力強度が+21.0dBm まで入力可能なので、より利得の出る増幅器に取り換えることでサイドバンドの振幅向上を狙うことや、3.4GHz での知見をもとに、共振器長を FSR が 3.4GHz に相当する場合と 6.8GHz に相当する場合それぞれに調整し、6.8GHz の電流変調を入れる。そして、先行研究の技術[5][6]を応用して、のこぎり波を用いた位相変調により、 ± 1 次間の相対比の調整の可能性を探りたい。

5. 参考文献

- [1] Steck, Daniel A.(Los Alamos National Laboratory), Rubidium 87 D Line Data (2001).
- [2]生澤謙太郎(電気通信大学), 体積型ホログラフィック回折格子を用いた外部共振器型半導体レーザーの特性評価(2013).
- [3]岡本航(電気通信大学), 室温原子を用いた ^{87}Rb 原子の特殊波長分光法, 平成 29 年度修士論文(2018).
- [4]THORLAB, 電気光学(EO)変調器,
https://www.thorlabs.co.jp/newgroupage9.cfm?objectgroup_id=2729.
- [5]浦川康, 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, 令和 2 年度卒業論文(2021).
- [6]末田正, 松島朋史 (大阪大学基礎工学部電気工学科), 変調器を用いた光周波数変換 (1987).