

^{87}Rb 原子の縮退ラマンサイドバンド冷却用 421nm 光源の開発

岸本研究室 1810049 井指佑一

1. 研究背景・目的

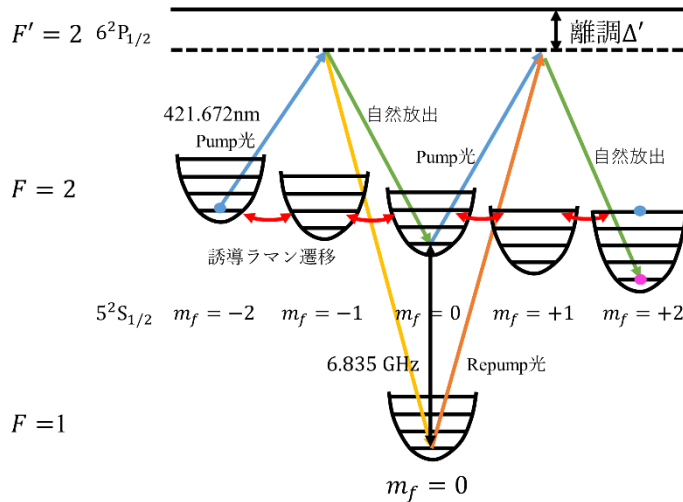


図 1 縮退ラマンサイドバンド冷却概略図[1][2]

本研究室では、ボース・アインシュタイン凝縮体 (BEC) の連続的生成に向けて ^{87}Rb 原子を用いて研究を行っている。BEC の連続的生成のためには原子の極低温への冷却，原子集団の高密度化といった一般的な BEC の生成のための課題に加え，トラップロスや原子冷却にかかる時間など BEC 生成効率を上げる必要がある。そこで本研究室では縮退ラマンサイドバンド冷却(図 1)を用いることを考えている。縮退ラマンサイドバンド冷却では，Pump 光 (図 1 青線)と，多くのレーザー冷却法と同様に，サイクルから外れてしまった原子をサイクルに戻すための Repump 光 (図 1 橙線) の 2 種類の光が必要である。これらの光を 2 本のレーザーを用いてもよいが費用，労力両面のコストがかかる。そこで外部共振器型半導体レーザー (ECDL) の共振器長を調整し，レーザーの電流変調によるサイドバンド生成をより効率的に行うことで，1 つのレーザーから Pump 光及びそこから約 6.835GHz 離調した Repump 光を作成する。

2. ECDL (外部共振器型半導体レーザー) の構成

ECDL とは一般的に LD (レーザーダイオード) などの外部に波長選択のできる機構と共振器長により中心波長と FSR (自由スペクトル間隔) を調整することのできる光学系である。ECDL の実効的共振器長 L_{eff} により選択される波長 λ ，振動数 ν は式(1)のとおりである。

$$2L_{\text{eff}} = m\lambda = m\frac{c}{\nu} \quad (m \text{ は整数}) \quad (1)$$

c は光速とした．式(1)を満たす波長あるいは周波数を持つ光は外部共振器により増幅される．すなわち複数の波長あるいは周波数成分を持つ光であっても式(1)を満たせば増幅が可能である．また式(1)より ECDL の FSR $\Delta\nu$ は式(2)のようになる．

$$\Delta\nu = \frac{c}{2L_{\text{eff}}} \Delta m \quad (2)$$

本研究では冷却に必要な光以外で原子と相互作用してしまう光を極力減らすために 1 次のサイドバンドを Repump 光として利用することを考えている．そのため $\Delta m = 1$ で FSR を超微細構造分裂幅と等しく $\Delta\nu = 6.835\text{GHz}$ とする．これらの条件を満たす実効的共振器長は $L_{\text{eff}} = 21.93\text{mm}$ となる．そのため系をコンパクトにする必要がある．そこで，VBG (Volume Bragg Grating) を利用し図 2 のような ECDL を作成することにした．

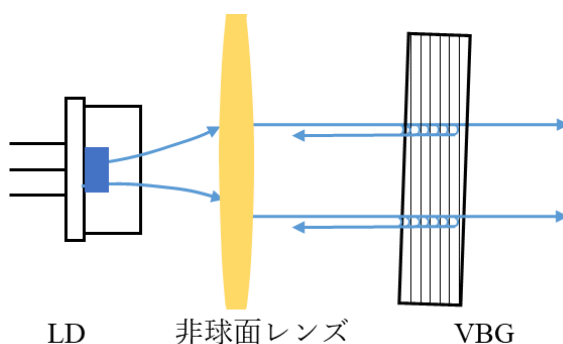


図 2 VBG を用いた ECDL の概念図

3. VBG (Volume Bragg Grating) の概要

VBG (Volume Bragg Grating) とは図 3 に示すように，シリカガラス中に幾層にも周期的に積み重なった屈折率構造を形成することでブラッグ回折による波長選択，及び厚みによる回折効率の指定ができる素子である[3]．ブラッグの条件

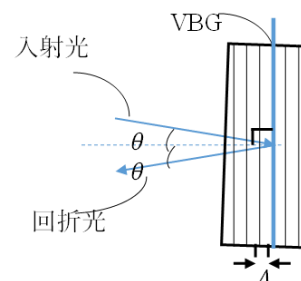


図 3 VBG の構造

$$2\lambda \cos \theta = m\lambda \quad (3)$$

により $\theta = 0$ で回折光を LD に返すことができるため波長選択フィルタと部分反射ミラーとして機能させ，ECDL をコンパクトにすることができる．VBG の表面と周期的層には角度差があるためブラッグ回折光は LD に戻るのに対し反射光は LD に戻らない．その為ブラッグ回折光のみを共振することができる．

しかしながら目的の中心波長，線幅，反射率，反射角度にすべてに合致した製品はなかったため，手に入る既製品の中で目的に近いものを選定した結果，目標の波長 421.672nm に対し 421.51nm 用のものを利用することにした．そこで VBG の温度依存性及び角度依存性により所望の 421.672nm に近づけるための測定実験を行うことにした．

4. VBG の特性評価実験原理

一般に物質は温度により幾何学的距離と屈折率の変化により光学距離が変化する。温度による物質の光学距離の変化量は式(4)によって表される。 S, T, n, α はそれぞれ光学距離、温度、屈折率、線膨張係数である。

$$\frac{1}{S} \frac{dS}{dT} = \frac{1}{n} \frac{dn}{dT} + \alpha \quad [4]$$

dn/dT 及び α は文献によって異なるものの $dn/dT = 1.09 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ [5] , $\alpha = 5.5 \times 10^{-7}/^{\circ}\text{C}$ [6] として見積もりを行った。温度変化に対し光学距離は線形に変化し、おおよそ 60°C 付近で所望の波長に達することが分かった。

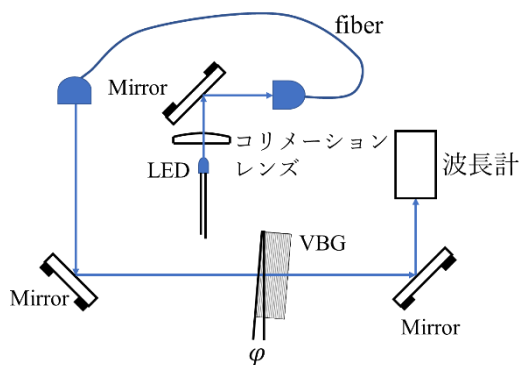


図 4 実験系概略図

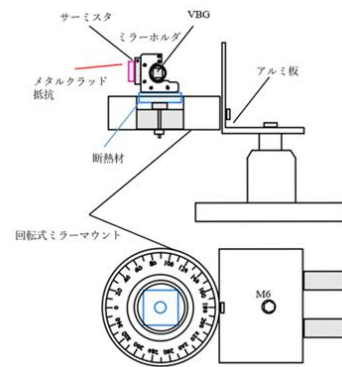


図 5 温調用 VBG マウント

そこで図 4 のような系を組み VBG の角度依存性、温度依存性の測定を行った。VBG の角度依存性を測定するために不確かさ 0.3 度程度で角度を測ることのできるミラーマウントを取り付け、その上に VBG のついたミラーホルダを乗せた。またメタルクラッド抵抗をミラーホルダに取り付けることによりジュール熱を利用した温調を可能にした。測温体であるサーミスタはヒーターとなるメタルクラッド抵抗を固定しているアルミ板につけ温度をモニターして測定を行った。

5. VBG の特性評価実験結果

測定結果は図 6, 図 7 のようになった。図の凡例に示した角度 ϕ は VBG の入射光と反射光の間の角度である。中心波長はおおよそ線形にシフトしており、 $\phi = -0.5$ 度において 21.2°C から 80°C に温調することで中心波長は 421.515nm から 421.677nm まで波長がシフトし、最小二乗法により今回の VBG は温度係数 $0.0026\text{nm}/^{\circ}\text{C}$ の特性があることが分かった。また、半値全幅に関してバラつきはあるが温度依存性はみられず、おおよそ 0.05nm であり、FSR にすると 84GHz となるため設計する ECDL の FSR, 6.835GHz に対して十分であった。

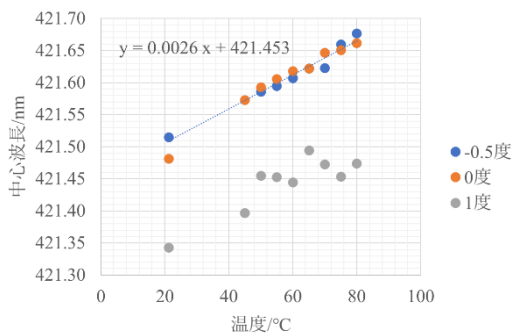


図 6 VBG の中心波長変化

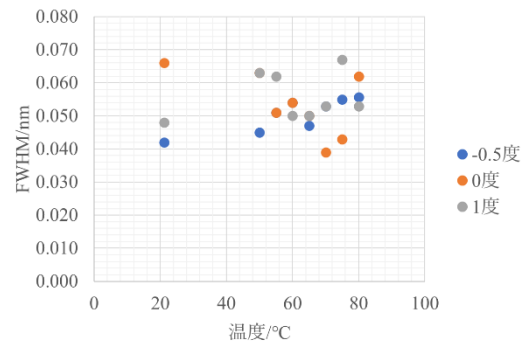


図 7 VBG の半値全幅変化

まとめと今後の展望

本研究は LD を電流変調し、さらに ECDL の共振器長の最適化を行うことで、サイドバンドを増強し、単一光源での⁸⁷Rb原子の縮退ラマンサイドバンド冷却用の Pump 光と Repump 光の生成を目指している。式(2)より共振器長を 21.93mm とコンパクトに設計する必要があり、VBG を用いることを考えた。用意できた VBG は 421.51nm 用であったため、21.2°C から 80°C まで温調することにより、中心波長は 421.515nm から 421.677 nm にシフトし、温度係数 0.0026nm/°C の特性があることが分かった。今後、実際に LD を購入し 6.835GHz の緩和発振定数の測定を行い電流変調が行えるかどうか検証を行う。変調が可能であれば実効的共振器長 21.93mm の ECDL の設計及び作成を行う。6.835GHz の電流変調が難しいと判断した場合、その半分の 3.417GHz の電流変調を行い、Pump 光と Repump 光が 6.835GHz 離調されるよう、-1 次のサイドバンドを Pump 光、+1 次のサイドバンドを Repump 光として利用することを検討している。その場合、式(2)により実効的共振器長 $L_{\text{eff}} = 43.86\text{mm}$ の ECDL の設計を及び作成を行う。

6. 参考文献

- [1] C. Glaser et al. Absolute frequency measurement of rubidium 5s–6p transitions. *Phys.Rev. A*, **102**, 012804 (2020).
- [2] C.-H. Wei, S.-H. Yan. Raman sideband cooling of rubidium atoms in optical lattice. *Chinese Physics B*, **26**, 080701 (2017).
- [3] F. Havermeyer, L. Ho, C. Moser. Compact single mode tunable laser using a digital micromirror device. *Opt. Express*, **19**, 14642–14652 (2011).
- [4] Rosalind Wynne, John L. Daneu, and Tso Yee Fan, "Thermal coefficients of the expansion and refractive index in YAG," *Appl. Opt.* **38**, 3282-3284 (1999).
- [5] C. Tan, J. Arndt. Temperature dependence of refractive index of glassy SiO₂ in the infrared wavelength range. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, **61**, 1315–1320 (2000).
- [6] ScienceDirect, Linear Coefficient of Expansion, <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/linear-coefficient-of-expansion> (2014).