

干渉フィルタを用いた外部共振器半導体レーザーの開発

中川研究室 学部4年 千葉学

1 背景・目的

今日、世界中で量子コンピュータ実現に向けた研究が行われている。我々の研究室では、光双極子トラップ中に単一の ^{87}Rb 原子をトラップし、その内部状態を量子ビットとして利用し量子情報処理を行う研究を行っている。単一原子をトラップするために青方離調させた D1 線(795nm)による光誘起衝突によって、光双極子トラップ中に数個トラップされた原子を光子の非弾性衝突によって、高効率でトラップを単一原子のみにすることを目標としている。[1]

また我々の研究室では ^{87}Rb 原子を冷却し、その原子波を干渉させることによって重力加速度を計測する、原子干渉計を開発している。原子干渉計は重力波観測や地質調査への応用が期待されている。その光源として D2 線(780nm)を利用して冷却用光源を必要としている。現在研究室で用いている回折格子を用いた外部共振器型半導体レーザー(ECDL)で実験していたが、回転機構のため振動によって周波数がずれてしまう欠点があった。そこで私は、振動に強い干渉フィルタを用いた波長可変 ECDL を開発し、干渉フィルタと LD をそれぞれ交換することによって、D1 線光誘起衝突用光源と、D2 線 ^{87}Rb 冷却用光源の開発を行った。

2 フィルタ型 ECDL の原理

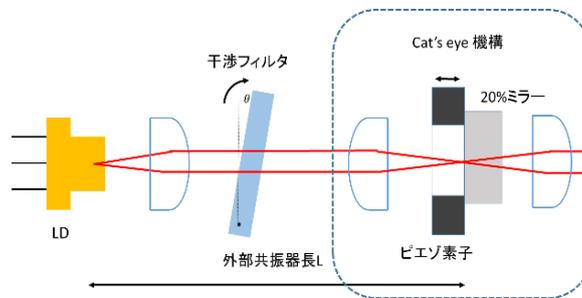


図 1 ; フィルタ透過型 ECDL 概略図

半導体レーザー(LD)のみで実験に使うことはできない。LD 電流を変えるのみでは波長選択の制御が困難であるからである。そこで外部で共振器を組む外部共振器半導体レーザー(ECDL)を作成し、ピエゾ電圧を変えることで外部共振器のミラーを動かすことによって波長選択を行う。

フィルタ透過型 ECDL とは図 1 のように、AR コートされた LD からコリメートレンズによってビームを平行にして出射した光を誘電体多層膜からなる干渉フィルタを透過させ、ピエゾにつけたミラーによって共振させる構造である。またレンズによってミラー面に焦点を合わせる Cat's eye 機構によって振動に強い安定なレーザーになる。これにより LD、ミラーが振動によってずれても戻り光が LD にカップリングするため振動に強いレーザー

になる。

選択される縦モードは、フィルタ透過率 T_{filter} 、外部共振器透過率 T_{cavity} 、LD 共振器透過率 T_{LD} 、LD 利得 G_{LD} とすると、

$$T_{total} = T_{filter} \cdot T_{cavity} \cdot T_{LD} \cdot G_{LD}$$

この積が最大のモードが選択されシングルモード発振する。

フィルタへの入射角 θ 、有効屈折率 η_{eff} 、最大垂直透過波長 λ_0 のときの最大透過波長は

$$\lambda(\theta) = \lambda_0 \sqrt{1 - \frac{\sin^2 \theta}{\eta_{eff}^2}}$$

で表される。[2]

用いたフィルタはデータシートより最大透過率 90%、半値全幅は 250GHz であった。この入射角を変えることによってピークを動かし、また縦モード間隔である FSR(Free Spectral Range)をピエゾ電圧と LD 電流を変えることで波長選択をしている。

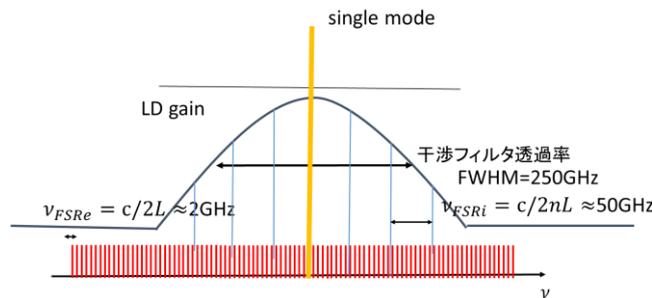


図 2 ; フィルタによる波長選択

3 フィルタ型 ECDL の製作

共振器長 $L = 8\text{cm}$ 、 $\text{FSR} = c/2L = 1.9\text{GHz}$ でフィルタ型 ECDL を図 3 のように設計した。アルミを用いて LD とレンズとミラーを一体構造にして、振動に強い設計にした。側面から微調ネジを入れることで金属ばねを動かしてフィルタの入射角度を変える。また取り外し可能なフィルタマウント(図 3 右下)をつくり、干渉フィルタと LD を交換することで D1 線光誘起衝突用光源と D2 線冷却用光源を作成した。図 4 のように完成した。

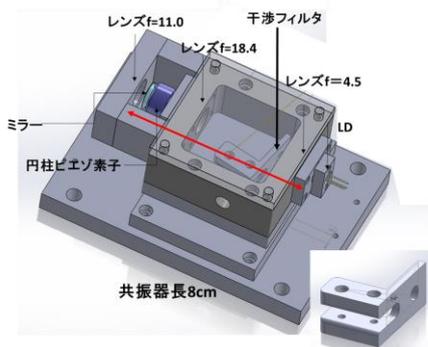


図 3 ; フィルタ ECDL の設計

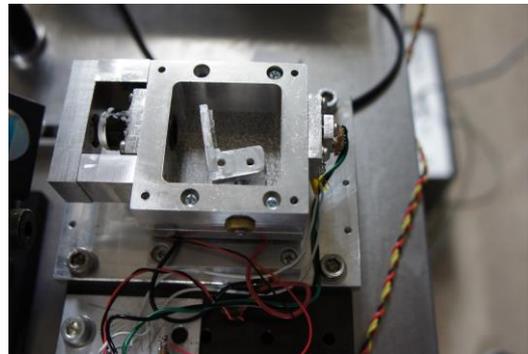


図 4 ; フィルタ ECDL 完成図

4 実験

4.1 線幅の測定(780nm)

線幅を 2 つのビートをスペクトルアナライザで観測するヘテロダイン法(図 5)によって求めた。求めるフィルタ ECDL の線幅はビート線幅の半分であるとする。最初に線幅を測定したとき図 6 のように 2MHz と線幅が想定より大きいものとなってしまった。原因としては LD のアライメントが悪く、戻り光とのカップリング効率が悪い。また LD 電源のアーシングが浮いていることによるラインノイズの影響が考えられた。これらの影響を改善した結果、閾値が 60mA から 35mA まで下がり、最終的な ECDL の線幅は約 170kHz であった。

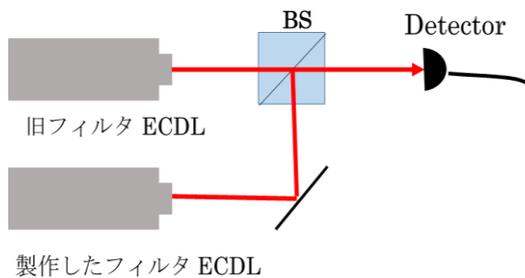


図 5 ; ヘテロダイン法によるビート計測

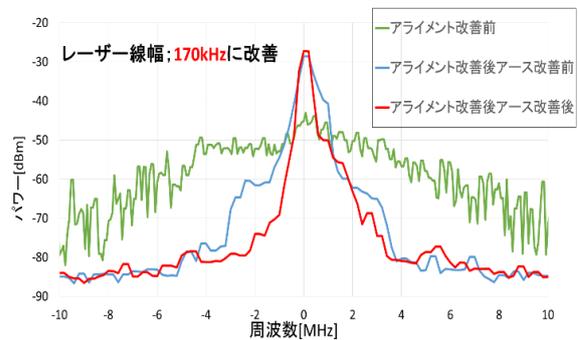


図 6 ; ビート線幅の測定

4.2 飽和吸収分光による D1 線(795nm)観測

原子は Maxwell-Boltzmann 分布で運動しているため、吸収線はドップラー広がりを持っている。飽和吸収強度より強いパンプ光によって励起させることで基底状態の密度分布にくぼみができる。くぼみの幅 $\Delta\omega_{hole}$ は自然幅 Γ 、飽和吸収強度 I_{sat} 、ビーム強度 I とすると

$$\Delta\omega_{hole} = \Gamma \sqrt{1 + \frac{I}{I_{sat}}}$$

で表される。これを対向させたプローブ光によって吸収信号を観測する。これによって原子が速度 0 のドップラーフリーな吸収線が観測できる。この分光法を飽和吸収分光という。私は作成したフィルタ型 ECDL を用いて D1 線の吸収線を観測した。実験光学系は図 7 のように組んだ。戻り光の影響を防ぐためアイソレータを通し、気体セル内でパンプ光とプローブ光が対向させるように入れた。発振器では、波長を掃引するために三角波を発生させ、ピエゾドライバでミラーを動かして掃引した。そのプローブ光の吸収線をオシロスコープで観測した。

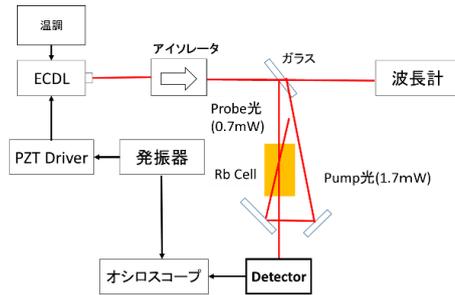


図 7 ; 飽和吸収分光実験系

結果は D1 線による吸収線は観測できたが、FSR が 1.9GHz と狭いため広く吸収線を見ることはできなかった。図 8 に⁸⁵Rbの準位図を示した。ここでは最もはっきり観測できた、⁸⁵Rbの F=3 から F'=2、F'=3 遷移の吸収線を図 9 に示した。このように本来ドップラー幅に埋もれてしまう超微細構造の吸収線を飽和吸収分光で観測することができた。

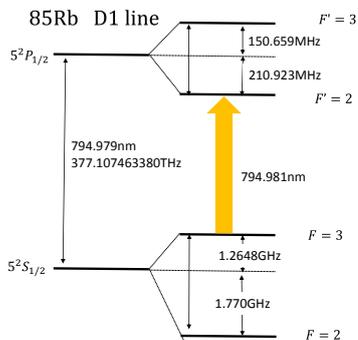


図 8 ; ⁸⁵Rbの D1 線準位図

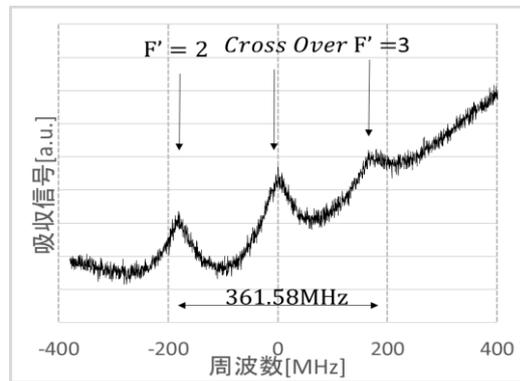


図 9 ; F=3 から F'=2、F'=3 の吸収線

5 まとめと今後の展望

設計通りのたたいても周波数が一定でアライメントがずれない、振動に強いフィルタ型 ECDL が完成した。しかしアライメントが難しいため発振効率が悪く、戻り光のカップリング効率を上げるために、LD マウントを微調節できる機構を考える必要がある。線幅は 170kHz 程度であった。今後は研究室のレーザーを回折格子型からフィルタ透過型へ置き換えて、原子干渉計用の光源として用いる予定である。

また飽和吸収分光法によって D1 線の吸収線を観測することができた。今後はレーザー吸収線にロックし、光双極子トラップ中に、作成した 795nm 光源で光を当てて⁸⁷Rb の単一トラップを実現することを目指す。

6 参考文献

- [1] "Preparation of a single atom in an optical microtrap" Alicia V Carpentier et al Laser Phys. Lett. **10** 125501 (2013)
- [2] "Interference-filter-stabilized external-cavity diode lasers" A. Bruschi, R. Le Targat, X. Baillard, M. Fouché, P. Lemonde, Phys. Rev. Lett. **96**, 103003 (2006)