

外部共振器型半導体レーザーの開発と 光周波数コムを用いたその周波数安定度評価

電気通信大学 量子物質工学科 中川(賢)研究室 四年 堀 憲真

1 目的

当研究室では主にルビジウム原子を用いた研究を行なっている。ルビジウムの原子操作には現在使用しているレーザーよりもよりスペクトル幅の狭いレーザーが求められている。そこで今回の研究ではルビジウム吸収線にロックする外部共振器型半導体レーザーの設計を見直し新規設計にて外部共振器型半導体レーザーを作成、安定化を図る。そして光周波数コムを周波数の基準として用い、そのスペクトル幅と周波数の安定度の評価を行なう。

2 原理

ルビジウムの吸収線に合わせたレーザーを出力するため、今回我々の研究室では回折格子をリトロ配置にて使用する方式を採用した。

2.1 リトロ配置の回折格子を利用した外部共振器型半導体レーザー

通常外部共振器とはミラーとミラーを合わせ鏡状に配置することで実現するが、今回の外部共振器型半導体レーザーではミラーの一つの代わりに図1のように斜めに配置した回折格子を利用している。これは、回折格子によって発生した1次回折光とレーザーダイオード (LD) とで共振状態を形成するもので、0次回折光を求めるレーザーとして取り出すものである。

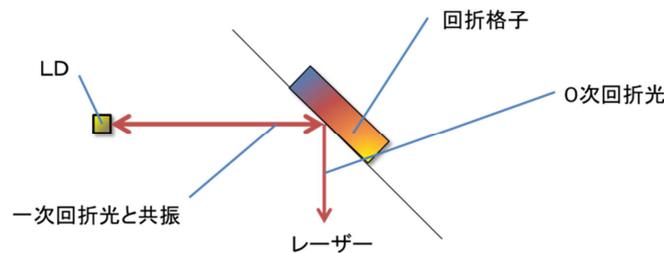


図 1 リトロ配置概形

この機構を採用することにより、回折格子の角度を変更することで出力レーザーの周波数を選択できるようになるので、今回はこの方式で外部共振器型半導体レーザーを作成した。

このタイプの外部共振器型半導体レーザーは当研究室でも以前から使われていたが、その線幅は数 MHz と広く、今後の実験には適さないという事態も発生しうる。よって今回の研究では、より狭線幅のレーザーを新規設計にて開発し、その評価を行なった。



図 2 従来型の外部共振器型半導体レーザーと新規設計の外部共振器型半導体レーザー

3 方法

今回レーザーを新規に設計するに当たり、以下の2点を改良した。

3.1 共振器長

シャウロー・タウンズの式によると、共振器の線幅限界 $\Delta\nu_{S,T}$ は以下のようになる。

$$\Delta\nu_{S,T} = \frac{c^2}{(2\pi L)^2} \frac{(1-R)^2}{R} \frac{h\nu}{P} (1 + \alpha^2) \quad \dots\dots(1)$$

c : 光速 L : 共振器長 R : 回折格子の反射率
 h : プランク定数 ν : レーザーの周波数 P : パワー
 α : 自然放出光による線幅増加のパラメータ

以上を見ると分かるとおり、共振器の長さ L を長くすることにより、その二乗に比例して線幅が狭くなることがわかる。

今回の実験では図2のように共振器長を 27mm から 55mm と延長し、狭線化を図った。

3.2 器械的安定性

従来使用していた外部共振器型半導体レーザーは、図3のように回折格子とLDとの位置調整のためのばね状の可動点が三つあり、しかもそのうちの二つが連結しているという不安定な構造となっていた。



図3 従来型の可動点

そこで、図4のように新規設計のレーザーでは回折格子の煽りの可動点を排除し、その代わりにLDに煽りをつける機構を搭載した。

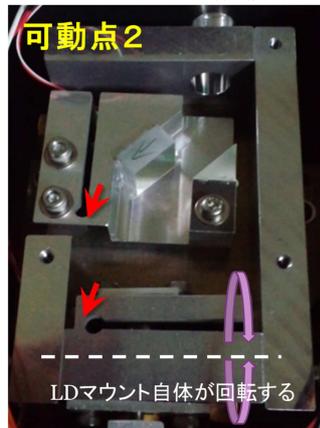


図4 新型共振器の機構

この新しい機構は、サイドからLDマウントを挟み込んで固定する方式になっている。そのため、回折格子は可動点一つを介してベースに固定され、またLDもサイドの面で固定されることになり、従来よりも共振器長が外部要因で変化し

にくい構造になっていると期待できる。

3.3 レーザー線幅の測定方法

レーザー線幅の測定方法として、今回の研究では以下の二つの方法を使用した。

3.3.1 ヘテロダイン法

ヘテロダイン法とは、図5のように二台のレーザーを重ね合わせ、そのビート信号をフォトディテクターで観測するものである。このとき観測されるビート信号の線幅は二台の線幅の和となる。

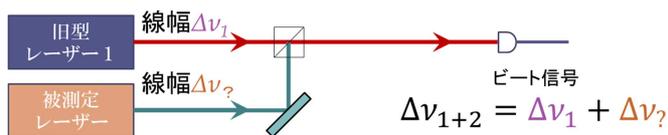


図5 ヘテロダイン法概略図

今回、従来型の共振器を二台、新型のものを一台用意し、従来型二台とのビート信号、新型×従来型のビート信号を測定し、比較した。

3.3.2 光周波数コムを用いたビート信号評価

さらに今回、チタンサファイアを使用したモードロックレーザーを利用して光周波数コムを作成し、それとのビート信号を観測することによって作成した新型レーザーの線幅を評価した。

光周波数コムとは、等間隔に鋭い線幅の周波数が櫛の歯（コム）状に立ったレーザーのことで、その間隔の周波数と、櫛の歯を仮想的に0Hz付近にもっていったときの余剰の周波数（オフセット周波数） ν_{CEO} をロックすることにより、被測定光と重ね合わせによって被測定光の線幅と中心周波数が測定できるというものである。

今回の光周波数コムの生成は、図6のようにした。

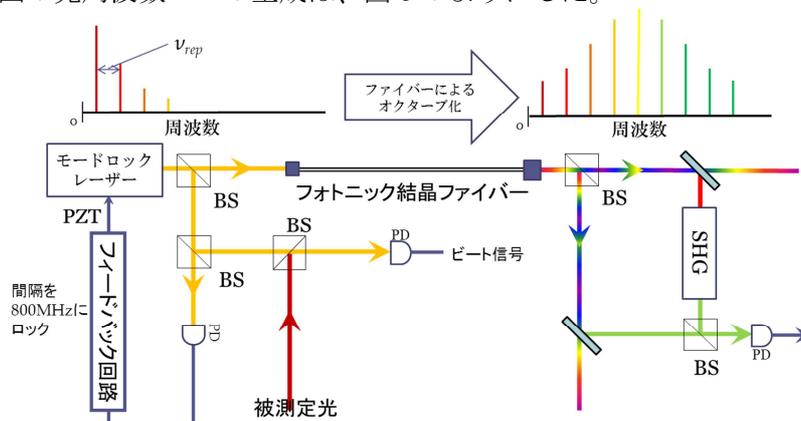


図6 光周波数コムの生成

まずモードロックレーザーから出力されるパルス光の繰り返し周波数をフォトディテクターで観測し、モードロックレーザーの間隔周波数 ν_{rep} をロックする。次にフォトニック結晶ファイバーにてそのレーザーをオクターブ程度にまで引き伸ばし、自己参照法を用いてオフセット周波数をロックした。

3.3.3 自己参照法

自己参照法とは、コムの周波数が低い部分 ν_{low} を取り出し第二次高調波発生 (SHG) を利用して倍化、元のコムの周波数が高い成分 ν_{high} と重ね合わせビート信号 ν_{beat} を観測する方法である。それにより、以下の(2-5)式のようにオフセット周波数 ν_{CEO} を観測することができる。

$$v_{low} = Nv_{rep} + v_{CEO} \quad \dots\dots (2)$$

$$2v_{low} = 2Nv_{rep} + 2v_{CEO} \quad \dots\dots (3)$$

$$v_{high} = 2Nv_{rep} + v_{CEO} \quad \dots\dots (4)$$

$$v_{beat} = 2v_{low} - v_{high} = v_{CEO} \quad \dots\dots (5)$$

4 結果

4.1 ヘテロダイン法

ヘテロダイン法によるビート信号は、以下の図のようになった。

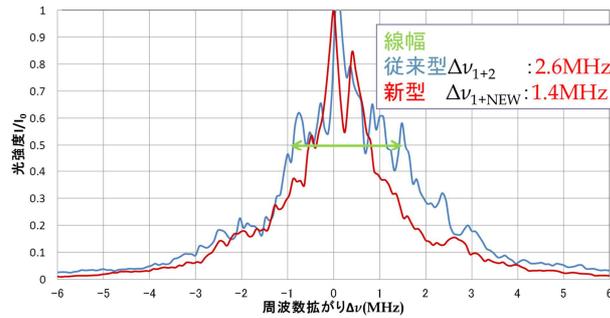
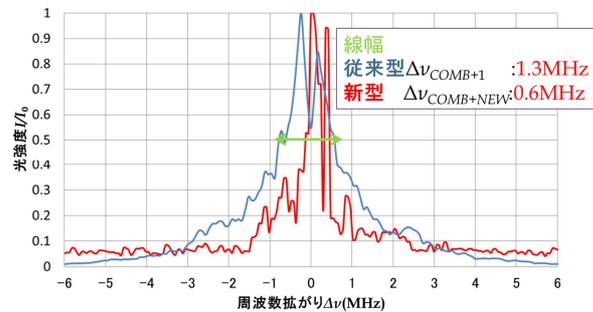


図 7 ヘテロダイン法による線幅測定

これによると従来型二台の半値全幅は 2.6MHz になったのに対し、新型と従来型とでは 1.4MHz と、狭くなったことが確認された。従来型二台の線幅が特定できないので厳密には見積もれないが、少なくとも従来型一台よりは狭い線幅を持っているということが確認された。

4.2 光周波数コム

光周波数コムとのビート信号の結果は、以下の図 7 のようになった。



従来型とコムとの重ね合わせの半値全幅が 1.3MHz になったのに対して、新型のものは 0.6MHz と、有意に狭くなっていることが観測された。

5 まとめと展望

今回作成した外部共振器型半導体レーザーは、従来のものと比べて線幅が十分に狭くなっていたことが確認された。その結果はコムとのビート信号からは 0.6MHz となったが、この実験ではレーザーはロックされておらず、観測中も揺らいでいたものと考えられる。そのため、実際の線幅はこれ以下となる可能性がある。

今後は、この新型外部共振器型半導体レーザーもロックし、その上でまた線幅を測定し、評価したい。

6 参考文献

『半導体レーザーの基礎』 応用物理学会 編 オーム社

『Rubidium 87 D Line Data』 Daniel Adam Steck Oregon Center for Optics and Department of Physics, University of Oregon