

1560nm 半導体レーザーの第二高調波を用いた

Rb 原子レーザー冷却用光源

中川研究室 1413091 鈴木皓詞

1. 背景・目的

我々の研究室では、レーザー冷却した Rb 原子による原子干渉計を用いて、高精度な重力加速度計の開発を行なっている。現在重力加速度計として実用化されているものは、コーナーキューブを真空中で自由落下させ、その位置と時間を光学干渉計で計測することで加速度を求めるものである。しかし、この方法ではコーナーキューブの傾きによって光路長が変化し、正確に重心の落下運動を測定できない場合があるため、得られる重力加速度の精度を $\Delta g/g = 10^{-8}$ 以上に向上させることは難しいと言われている。また、この方法にはコーナーキューブの自由落下を繰り返すため装置の寿命が短く、こまめなメンテナンスが必要だという短所もある。

一方、原子干渉計はレーザーで真空中にトラップされた原子を使用する。この原子は外部及び内部状態が揃うため、得られる重力加速度の精度が $\Delta g/g = 10^{-9}$ に向上することが期待されている。この原子干渉計による重力加速度計は、潮汐による重力加速度の変化や万有引力定数 G のような基礎物理定数の測定だけでなく、石油や水などの地下資源の探査にも役立つとして注目されている

我々の研究の最終目的は先に述べたように重力加速度計を開発することであるが、実際に重力加速度計をそれが必要とされる環境で動作させるためには、コンパクトで運搬可能であること、そして頑丈であることが必要とされる。そこで本研究では、温度変化や振動に強く、アライメントがずれる心配もないファイバー出力の外部共振器型半導体レーザー (ECLD) の開発を目的とした。また、ファイバー出力の半導体レーザー (LD) は Rb 原子冷却に必要な波長に対応していないため、1560nm の LD の第二高調波を用いて 780nm のレーザーを取り出すことも目的とした。

2. 原理

2.1 外部共振型半導体レーザー (ECLD) の構造

半導体レーザーは、電流を上げていくと熱膨張や活性層の屈折率の変化によって共振器長が変化するため温度安定度が低く、縦モード間隔が短いため波長選択性が悪い。そこで、外部に共振器を作り、 piezoelectric (PZT) によって電圧で共振器長を変えることができる外部

共振器を作成することで、レーザー周波数を安定化することができる。

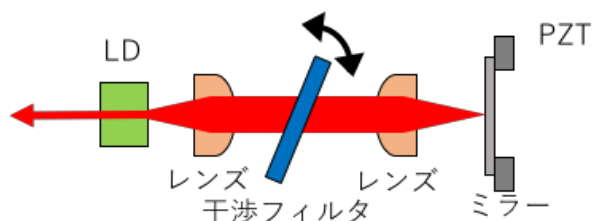


図 2.1 フィルタ透過型 ECLD

2.2. 第二高調波発生(SHG)

2.2.1. SHG の原理

SHG とは、光が非線形光学結晶と相互作用することにより、元になった光の 2 倍の周波数の光を発生させる現象のことである。

物質中を光が通過すると、電場によって物質中の正の電荷を持った部分と負の電荷を持った部分の間に変異が生じ、双極子モーメントが発生する。

光の電場は高い周波数で振動しているので分極も同じ周波数で振動しており、双極子の振動から電磁波が発生する。分極 P と電場 E の関係は、

$$P = \chi^{(1)}E + \chi^{(2)}E^2 + \chi^{(3)}E^3 + \dots \quad (2.1)$$

といった非線形の関係になる。ただし、 $\chi^{(n)}$ は n 次の電気感受率である。光の各周波数を ω 、振幅を E_1 とすると、光の電磁波 E は

$$E = E_1 \exp(i\omega t) \quad (2.2)$$

とかける。分極波 P は、式(2.1)を式(2.2)に代入して次のように表せる。

$$P = \chi^{(1)}E_1 \exp(i\omega t) + \chi^{(2)}E_1^2 \exp(2i\omega t) + \chi^{(3)}E_1^3 \exp(3i\omega t) + \dots \quad (2.3)$$

式(3)から、分極によって生じる電磁波は入射した基本波の整数倍の波長の波で構成されていることがわかる。これらの項のうち、第二項が 2 倍の周波数である第二次高調波に対応した項である。

2.2.2. 位相整合

位相整合とは、強い第二高調波を得るための条件である。基本波と第二高調波が位相差を満たすためには、それぞれの位相速度が等しい必要がある。なぜなら、位相速度が等しくなければ位相がずれた場所で基本波と第二高調波が打ち消しあってしまうからである。

下図 2.2 のように、位相整合が成り立っている場合 ($\Delta k = 0$) では第二高調波は伝搬距離の二乗に比例した強度で得られるが、位相整合が成り立っていない場合 ($\Delta k \neq 0$) は位相速

度のずれから周期的に打ち消しあってしまうため、第二高調波の強度は正弦波状になる。

しかし、一般的に位相速度は波長に依存しているため、波長が異なる基本波と第二高調波では位相整合を満たすことができない。そこで、異方性の結晶による複屈折性というものを利用する。複屈折性とは、光の偏向方向によって異なる2つの屈折率が存在する性質のことである。この性質によって、光の進行方向を調整するか、温度による屈折率の変化を利用することで位相整合を満たすことが可能になる。

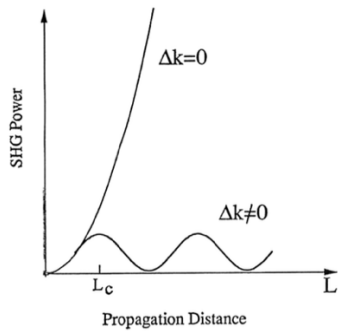


図 2.2 ある光の伝搬方向に対して
あたえられた屈折率の波長分散

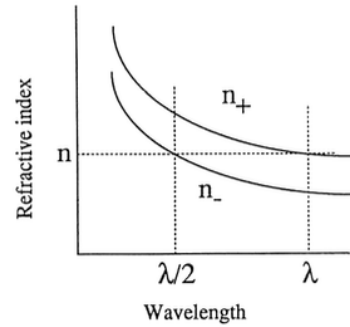


図 2.3 位相整合が成り立っている場合、
いない場合の第二高調波出力
参考文献[1]から引用

3. 実験

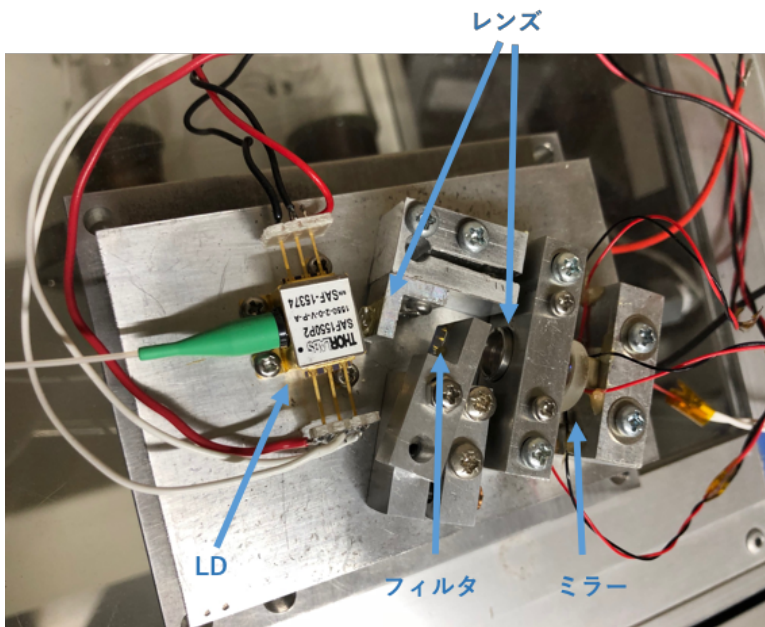


図 3.1 原子干渉計用 ECLD

上図 3.1 が製作した原子干渉計用 ECLD である。共振器長は 8cm、レンズの焦点距離は

LDに近い方から順に 3.31mm、7.61mm となっている。

4. まとめと今後の展望

ECLDは無事発振させることができ、電流が 100mA のときの周波数を 1560.39nm に合わせると、作成した ECLD の電流出力特性は下図 4.1 のようになった。

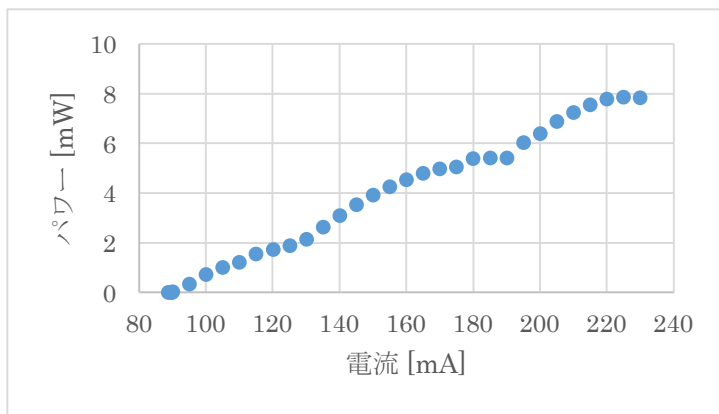


図 4.1 ECLD の P-I 特性

ECLD の閾値は 89mA であった。

一方、第二高調波は全く発生させることができなかった。その原因は明白で、手違いで使う予定だった SHG モジュールと違う周波数に対応した SHG モジュールが届けられてしまい、型番の違いに気付かずそのまま使用しようとしていたためである。

今後の展望としては、まず正しい SHG モジュールを入手し改めて第二高調波が得られるかを確認すること、そしてそれが確認されたなら実際に第二高調波を用いて Rb の吸収線を観測することである。

また、振動に対しより強固にするため、LD に近い側のレンズの微調機能を無くし、接着剤などで完全に固定すべきなのではないかとも考えている。

参考文献

- [1] 立野公男『フレッシュマンのための現代光学-VII SHG 光学(1)』、光学 第 23 巻 第 1 号 (1994)
- [2] 霜田光一『レーザー物理入門』、岩波書店(1983)
- [3] 服部利明 『非線形光学入門』、裳華房(2009)