

Rb 原子の光双極子トラップ用の 高出力単一周波数 Nd:YVO₄ レーザーの開発

量子物質工学科 0913069 竹村直貴

[背景と目的]

我々の研究室では、原子干渉計による重力加速度計測のために、Rb 原子のボーズアインシュタイン凝縮 (BEC) 生成を目指している。原子を BEC の状態にするためには予め多数の原子をトラップする必要があり、そのトラップ方法として磁気光学トラップ (MOT) 後、光双極子トラップもしくは磁気トラップを行う。我々は光学アクセスの良さと BEC 生成時間の短さから光双極子トラップを用いている。光双極子トラップはレーザー場中に原子が受ける双極子力を利用している。原子が双極子力で力を受ける方向は、共鳴周波数よりレーザーの周波数が高いか低いかで変わり、高い場合は青方離調といい斥力を感じ、低い場合は赤方離調といい引力を感じる。また、多モード周波数で光双極子トラップを行うとトラップの寿命が短いという問題があり、単一モード周波数で行うことで解決できた。したがって、Rb 原子の共鳴周波数に対し赤方離調の波長 1064nm をもち、10W 以上の高出力単一周波数 Nd:YVO₄ レーザーの開発を行った。

[原理]

(1) レーザー動作原理

今回制作したレーザーは半導体励起固体 (DPSS) レーザーである。DPSS レーザーの利点としてレーザー媒質が固体なので高出力が期待できることがある。Nd:YVO₄ DPSS レーザーの動作原理は 4 準位レーザーとして説明できる。YVO₄ 結晶に不純物として Nd³⁺ イオンを加えると、808nm の帯域で強い吸収をもつようになる。吸収されたエネルギーは熱エネルギーと 1064nm の光として放出され、これがレーザー光として出力される。Nd³⁺ イオンを含むレーザー媒質として他にも Nd:YAG、Nd:YLF、Nd:GdVO₄ などがあるが、Nd:YVO₄ はそれらに比べて 808nm での吸収線幅が広く、直線偏光を得られるので今回は Nd:YVO₄ 結晶を用いた。

(2) 熱レンズ効果

レーザー共振器は下図 1 の bow-tie 型となっていて、Nd:YVO₄ の両端に 808nm のパンプ光を当てるエンドパンプ法を用いた。両端のパンプ光のパワー吸収により結晶中で温度勾配が生じ、結晶がレンズのように働く。これを熱レンズ効果という。この焦点距離は結晶の熱吸収に反比例し、またパンプ光の照射面積に比例する。今回設計した条件では、熱レンズの焦点距離 f は 112mm となった。

(3) 共振器長の上限

共振器長 L には熱レンズ効果により上限がある。 $L \geq 4f$ になってしまうと発振光が共振器内から漏れ出し、レーザーとしてはしんされなくなってしまう。なので共振器長は $L < 4f$ でなくてはならない。今回共振器長はできる限り短くなるように 370mm に設計したのでこの条件は十分に満たしているといえる。

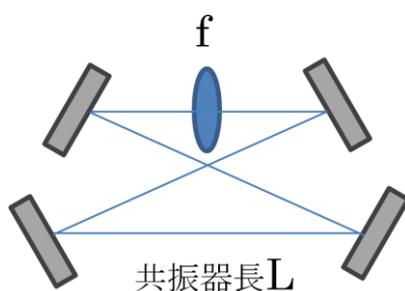


図 1 共振器

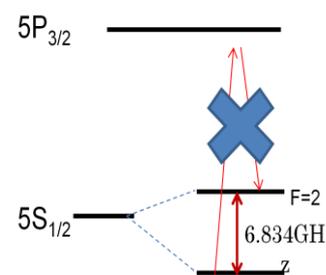


図 2 遷移共鳴

[レーザー目標性能]

今回光双極子トラップに用いるために必要な性能として、パワー18Wを揺らぎ1%程度で安定に出力できる。ビーム径を $40\mu\text{m}$ まで絞らなくてはならないので、空間モードはシングル空間(TEM₀₀)モード(ビーム径を $40\mu\text{m}$ まで絞ればマルチモードでも可)。周波数モードはRb原子の $5S_{1/2}$ のF=1からF=2に遷移共鳴しない自由スペクトル領域:FSR(FSR=光速/共振器長、 $n \cdot \text{FSR} = 6.834\text{GHz}$ でなければ共鳴しない)を持つマルチモードもしくはシングル周波数モードであればよい(前ページ図2参照)

[Nd:YVO₄励起固体レーザーの設計]

設計したレーザーは下図3のようにになっている。パンプ光の最大出力は25W(計50W)。共振器はミラー4枚を使ったbow-tie型で右下のミラーが低反射ミラーとなっていてそこからレーザー光を出力する。また、両方向発振してしまうと出力が減る、また共振器内で定在波が立ってしまい、結晶がホールバーニングを起こし結晶が割れてしまう恐れがあるので、図のようにアイソレータをいれ、一方向発振をするようにしている。

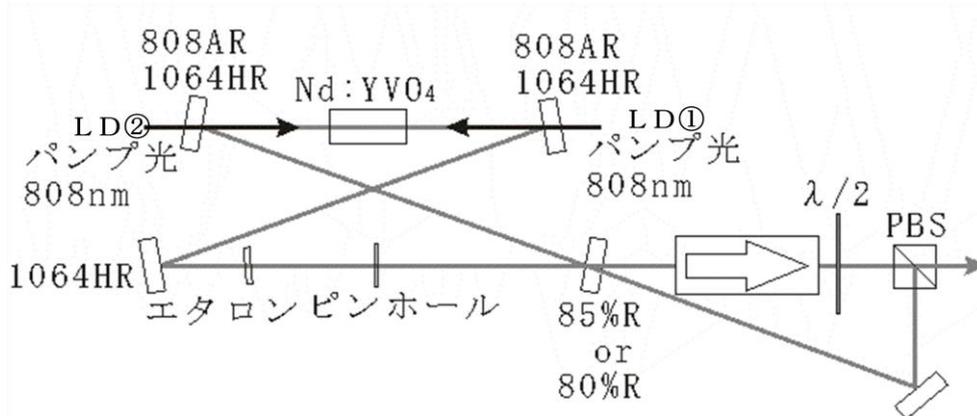


図3 Nd:YVO₄励起固体レーザーの設計

[作成物]

下図4が今回作成したものとなる。右上が共振器全体となっている。パンプ光は2枚のレンズを使い結晶端面で最小ビーム径になるよう集光している。右下がパンプ光(LD)の台、左が結晶ホルダーとなっている。この2つはかなり温度が高くなるので、結晶ホルダーはペルチェ素子と水冷を、LD台はペルチェ素子と水冷、そしてアイソレータを用いて温調を行っている。

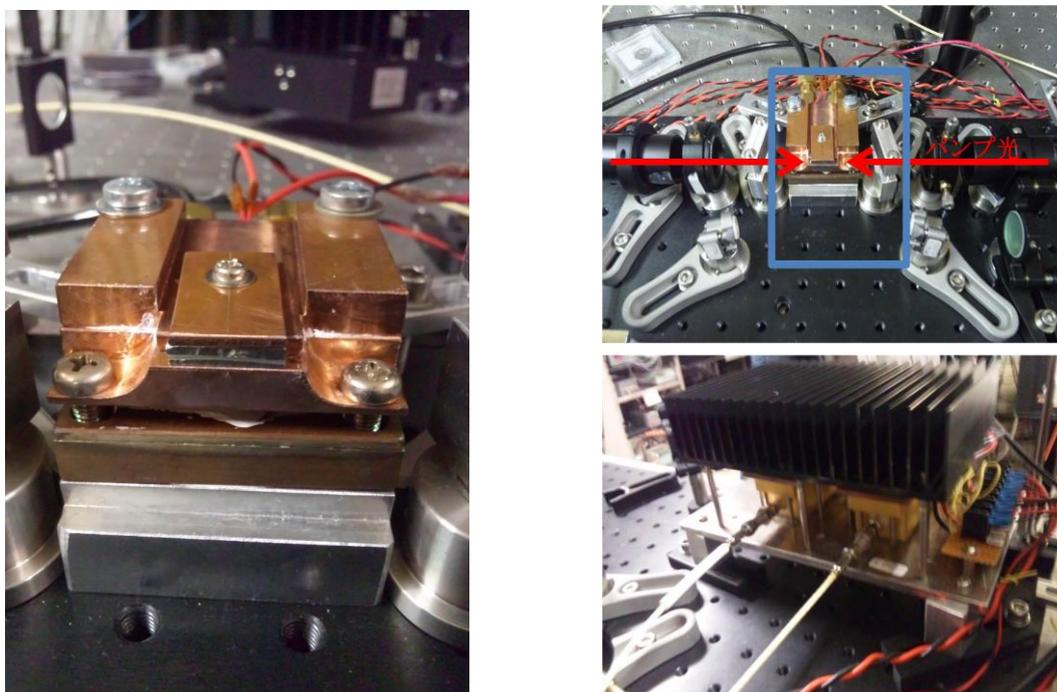


図4 作成物

[発振パワーの考察]

まず4×4×10mmの結晶を用いて発振した。測定方法は図5のように1方向をミラーで反射して両方向をパワーメーターで測っている。しかし最大出力11Wで目標の出力に達しなかった(図6参照)このときのLD温調は25℃、結晶温調30℃、反射率85%ミラーを使用していた。原因は結晶と温調、ミラーの反射率にあると思い、そのパラメータを変化させることにした。

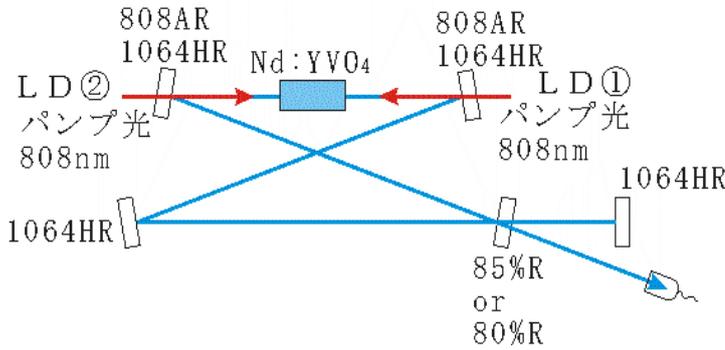


図5 測定方法

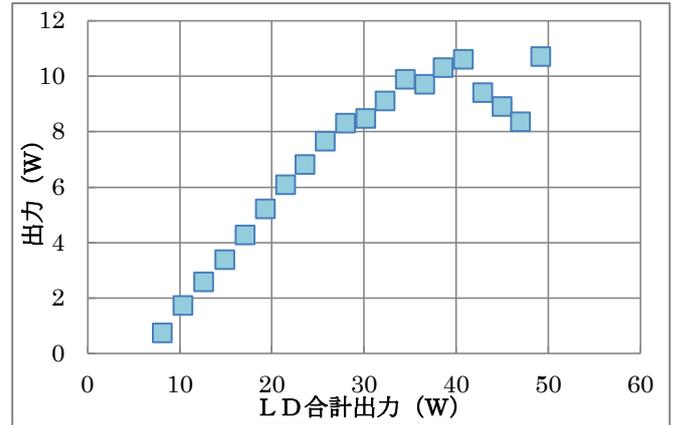


図6 発振パワー1

まず、LDの温調を変化させた。結果を下図7、8に示した。このことからLD①は25℃、LD②は28℃に再設定した。温調を変えると出力が変化するのはLDの温度によってLDの発振波長が微妙に変化するからで、それにより結晶の吸収パワーが変化するためである。

LD①出力(W) : LD②温度25℃固定

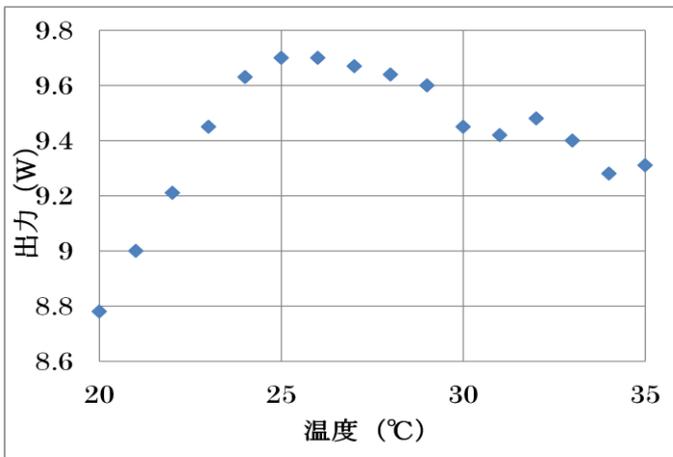


図7 LD①温調変化

LD②出力(W) : LD①温度25℃固定

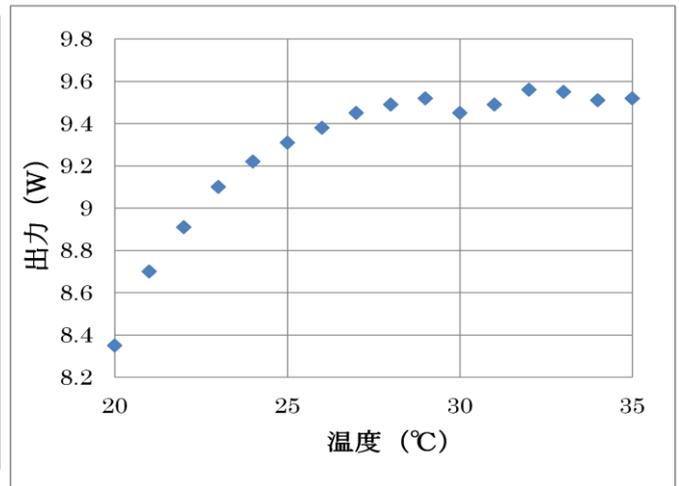


図8 LD②温調変化

次に結晶温調を変化させた。結果は図9に示した。

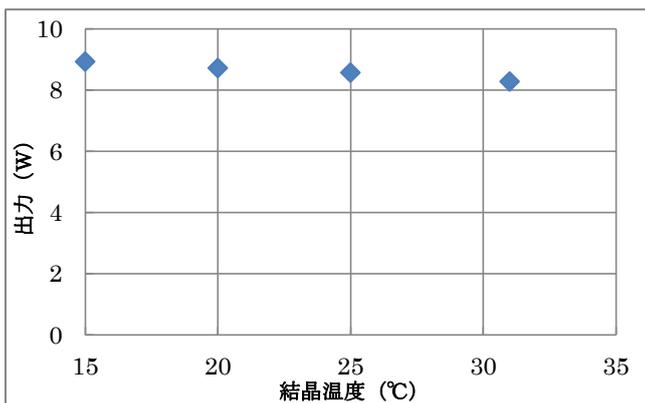


図9 結晶温度変化

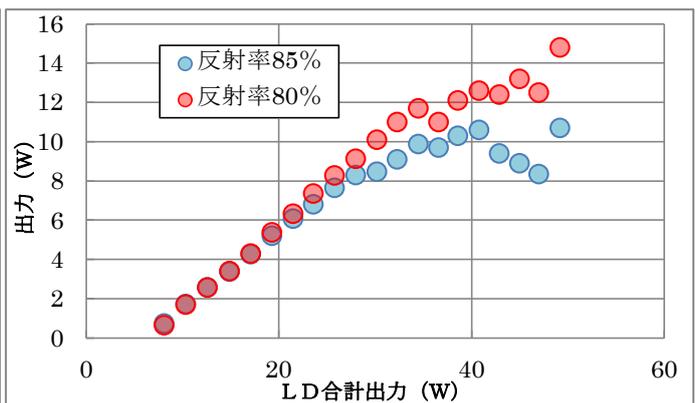


図10 ミラー反射率変化

結晶温度を低くすると出力が上がるのは、結晶内の下準位が増え、反転分布を形成しやすくなったからだと思う。なので出来るだけ温度を低くしたいが、低くしすぎると、結晶が結露してしまい結晶が割れてしまう恐れがあるので、結露しないように 20°C に再設定した。またミラー反射率を変化させたときの出力変化を前ページ図 10 に示した。図を見ると反射率が低いほうが出力が増えている。これは低いほうが透過する光が多くなり、その分出力が増えるからである。最後に結晶を急結晶 (4×4×10mm) から新結晶 (3×3×15mm) に変えて測定した。測定結果は図 11 に示した。図を見ればわかるとおり新結晶に変えると出力がかなり増え、最大 20W まで達した。出力は目標に達したがこの時の空間モードを調べると図 12 に示す通り高次のモードが入っていた。これを改善するためには、共振器内にピンホールを入れなければならない。ピンホールを入れると高次のモードを持つ光はピンホールによって通らず、シングルモードのみ通すことができる。しかしピンホールの径が大きすぎると高次のモードを通してしまうので、しっかりとピンホールの径を設定しなければならない。

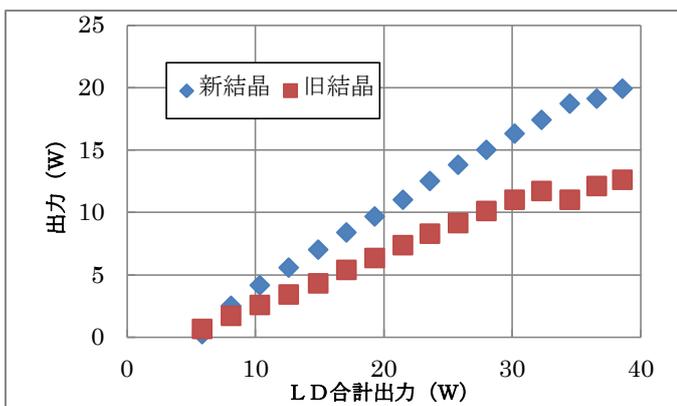


図 11 結晶変化

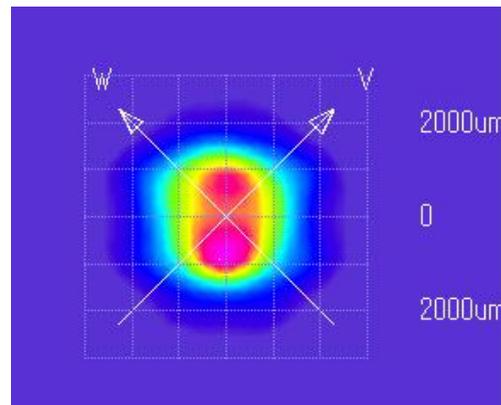


図 12 18W 時の空間モード

[まとめとこれからの展望]

今回作成したレーザーはしっかりと発振できて出力も 20W 近く出すことができた。しかし、空間モードがマルチで周波数モードも調べていないのでまだ双極子トラップには使えない。なので今後の予定はまずピンホールを入れ空間モードを選択。次にアイソレータを入れて一方向発振をさせる。エタロンを入れ周波数モードを選択。そして実際に光双極子トラップの光学系に組み込むということをしていきたい。

参考文献

・ *W.F. Zhao, W. Hou, L. Guo, G. Li, X.C. Lin, and J.M. Li*

12 W high efficiency single frequency ring laser *Laser Phys.*

Lett. 7, No. 3, 210–212

・ 電気通信大学, 向山研究室

・ 東京大学, 齋藤 裕介, 福岡 健太 井上 慎研究室

「混合ボース気体の共振器増幅光トラップに向けた単一モード DPSS レーザーの開発」