

LD励起モード同期Yb³⁺:Y₂O₃セラミックスレーザーの研究

植田研究室 谷所 基行

1. 序論

「フェムト秒モード同期レーザー」は超高速物理現象や化学現象の観測や、微細加工技術など様々な分野に有効である。その中でもYb³⁺:Y₂O₃はLDで励起が可能というコスト面で非常に優れた点がある。しかし、今までは単結晶を用いた報告が多く、セラミックスを用いた報告は少ない。セラミックスは単結晶に比べて作成の自由度が高く、特にY₂O₃は高融点(約 2430)のため単結晶成長が非常に困難であったが、セラミック技術によって容易に作成することが可能となった。本研究ではYb³⁺:Y₂O₃セラミックスを用いて「SESAM モード同期」と「カーレンズモード同期」の 2 種類のモード同期実験に試みる。

2. Yb³⁺:Y₂O₃セラミックス

本研究では、Ybを 8%添加した厚さ 1.5mmの Yb³⁺:Y₂O₃セラミックスを使用した。その吸収と蛍光のスペクトルを図.1 に示す。Yb³⁺:Y₂O₃セラミックスのモード同期発振は波長 1037nmと 1076nmで得られる。本研究では 1037nmでモード同期発振に試みる。この理由は、図.1 より Yb³⁺:Y₂O₃セラミックスの誘導放出断面積は 1037nmのほうが大きい。誘導放出断面積が大きいとSESAMにおける飽和強度 I_{sat} を低く設定することができる。すなわち、利得飽和を容易

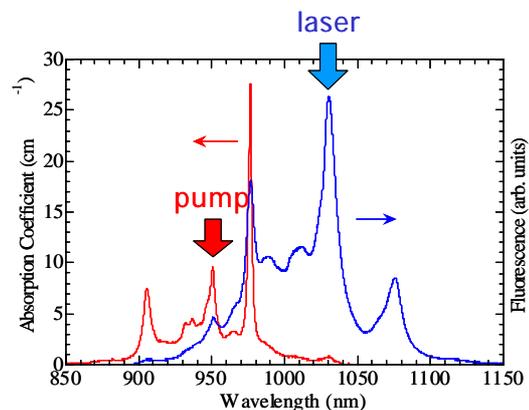


図.1 Yb³⁺:Y₂O₃セラミックスの吸収と蛍光のスペクトル

にし、モード同期が得やすくなる。逆に 1076nmでは I_{sat} が大きすぎるので、Q-スイッチによる不安定性によりモード同期が得にくくなる。同時にSESAMを壊しかねない。

3. モード同期の原理

本研究で用いるSESAM(半導体可飽和吸収体鏡)は、A-FPSA構造をしており、飽和吸収 2%、中心波長 1045nm、飽和フルーエンス 30 μ J/cm²、キャリア回復時間 10psである。構造を簡単に言えば、反射率の高い鏡の表面に可飽和吸収体を担う半導体がコーティングされたものである。SESAMに光強度の強い光が入射すると、吸収体の吸収係数が減少し始める。やがて、飽和強度 I_{sat} に達すると、SESAMはほぼ吸収飽和し、高い反射率をもった鏡となる。この間、光は共振器中へパルスとなって放出される。このパルスの発生が共振器中で一定の間隔で繰り返され、モード

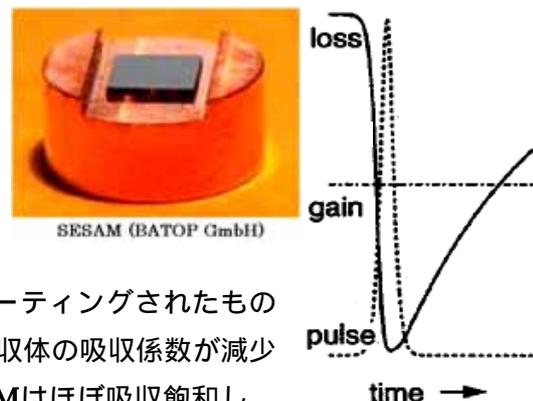


図.2 SESAMの吸収飽和とパルス発生

同期となる。

カーレンズモード同期は空間的カー効果による利得変調が媒質に屈折率分布を生じ、これがビームを集束させる。すると、共振器のほぼ全体にわたり、光強度が強いほどビーム径は小さくなるから、そこへスリットを挿入し、損失変調を起こすことによって、モード同期となる。

2つのモード同期の違いはパルスが発生する時間である。

SESAMのパルス発生時間、即ち吸収飽和から回復する時間は

約20psである。それに対し、カーレンズ効果が起こり、パルスが発生する時間ももっと短い(フェムト秒領域)。これにより、カーレンズモード同期ではSESAMモード同期に比べてパルス幅が短くなると予想できる。本研究ではSESAMによるモード同期発振を観測後、カーレンズモード同期により、さらなるパルス幅の短縮を期待した。

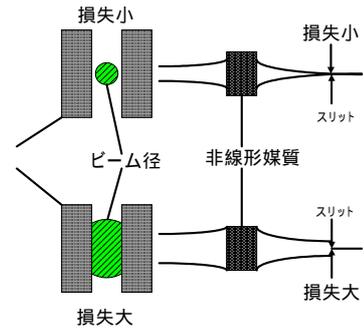


図.3 自己集束効果とスリットの組合せ

4. 実験

4.1 SESAMモード同期

図.4がSESAMモード同期発振の実験図である。使用した励起光源は波長950nmのLD冷却装置を施し、19に保った。4枚のシリンドリカルレンズによって、LDのビームを $30 \times 160 \mu\text{m}^2$ ぐらいに変えた。実験の流れはまず図.4の破線で示したラインでTEM₀₀モード発振させる。次にプリズム(Prism 1)を挿入し、実線で示したラインで発振させる方法をとった。試料 $\text{Yb}^{3+}:\text{Y}_2\text{O}_3$ は発振しきい値が低い1076nm付近で発振を開始する。1035nm付近での発振は、ナイフエッジを挿入する事で得た。共振器設計により、ビーム径は試料付近で約23 μm 、SESAM付近で約47 μm となっている。共振器長はで1.53m繰り返し周波数は98MHzに相当する。プリースタープリズムは、パルス幅の広がりを補償するために用いた(negative GDD)。LDの出力を次第に上げていき、励起強度1.8Wになった時、モード同期を得た(SESAMが吸収飽和し、出力が~55mWから~65mWまで上昇)。この状態のまま、励起強度を最大にし、平均出力190mWを得た(最大励起強度4W)。しかし、励起強度を強めるほど、CW発振がスペクトルに観測され始め、モード同期は不安定になっていくのがわかった。

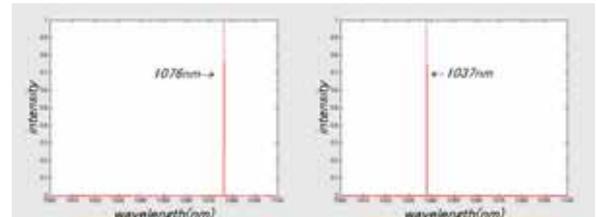
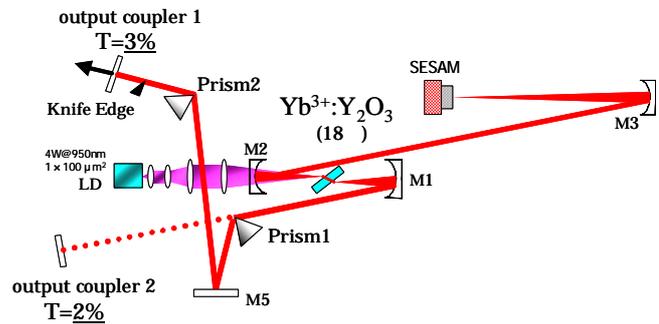


図.4 SESAMモード同期実験図(上)と発振スペクトル(下)

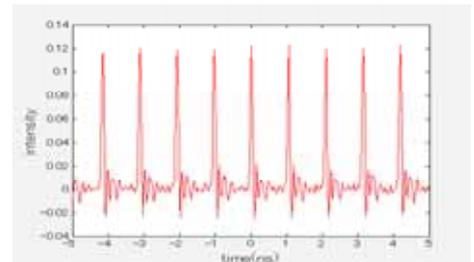


図.5 モード同期パルス波形(10ns/div)

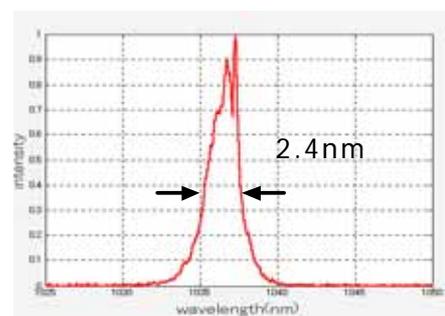


図.6 モード同期発振時のスペクトル

パルス幅の測定は、第2次高調波発生現象を利用した自己相関計を利用した。第2次高調波発生のための結晶には、厚さ0.5mmのBBO(type-I-BaB₂O₄)を用いた。

観測した相関波形の相関幅 (FWHM)と実際のパルス幅 t_p (FWHM)との間にはパルス波形に依存した一定の関係がある。

$$\frac{\Delta\tau}{t_p} = 1.55$$

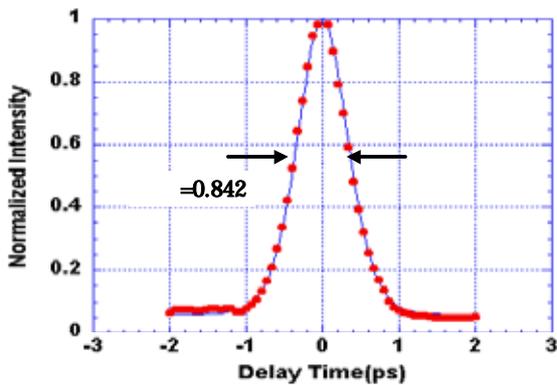


図.8 相関波形(sech²-fitting)

4.2 カーレンズモード同期

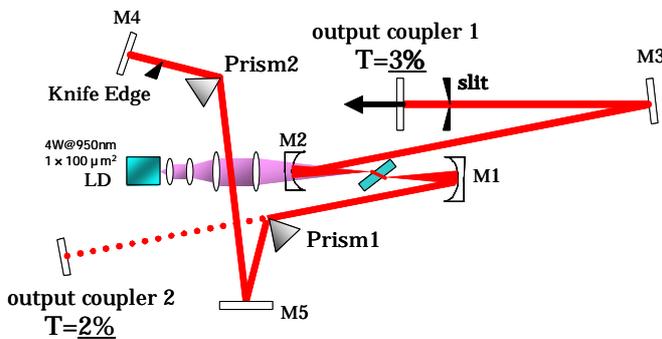


図.9 対称型共振器によるカーレンズモード同期実験図

発振が得やすいことが指摘されている。現に、シミュレーションでは共振器の安定条件を満たすような凹面鏡の間隔は非対称型に比べ、対称型は広範囲に及ぶことが分かった(図.10)。

実験はSESAMモード同期のときと同様に行った。共振器の両腕の長さは等しい0.9mで、共振器長は1.8m(繰返し周波数83MHz)とした。スリットを適当な幅に狭めると、変調は垣間見られたが、モード同期発振は観測することはできなかった。透過率1%のoutput-couplerに換えても観測できなかった。

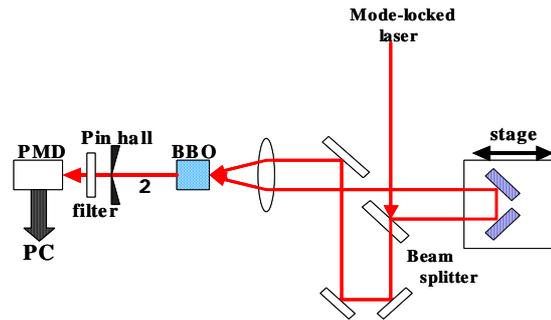


図 .7 自己相関計

この関係から、パルス幅は $t_p=543\text{fs}$ であることがわかった。

以下に得られた結果をまとめる。

平均出力	190 [mW]
スペクトル幅	2.4 [nm]
時間帯域幅積	0.363
パルスのエネルギー	1.93 [nJ]

カーレンズモード同期では、媒質をはさむ2枚の凹面鏡の間隔(M1~M2)が極めて重要になってくる。そこで、各凹面鏡から終端までの距離が等しい対称型共振器と終端までの距離が等しくない非対称型共振器の2種類の共振器を構成した。図.9には対照型共振器を示した。対照型共振器は、非対称型に比べ、安定なモード同期発振が

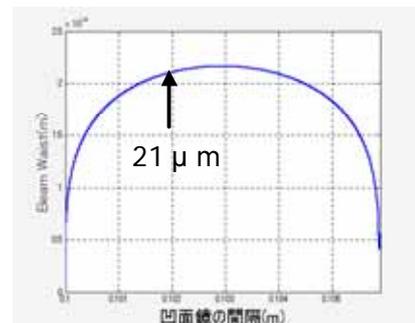


図 10 ビームウェストの変化(対称型)

5. 結論

図.11 は波長 1076nm で観測した緩和発振と Q-スイッチである。

カーレンズモード同期が観測できなかった原因はいくつか考えられる。

カーレンズモード同期は SESAM モード同期に比べてアライメントが非常に難しい。自らのアライメントの腕を磨くことが最重要課題である。

モード同期には高い共振器内パワーが必要である。しかし、CW 発振時の引き出し効率は相対的に低かった。プリズムなどの内部損失を軽減する方法を検討する必要がある。

LDから共振器に入射するビームの形は、シリンドリカルレンズを通したとはいえ、 $30 \times 160 \mu\text{m}^2$ という平たい形をしている。したがって、励起光とレーザー光のモードミスマッチングを改善しなければならない。

共振器設計において、sagittal面、tangential面で凹面鏡の実効的な焦点距離 f_s, f_t が異なる。また、光線行列を解く際、媒質の厚さ、自己収束効果、線形屈折率及び非線形屈折率を考慮に入れなかった。これらを考慮した計算を行ない、光強度とビーム径の関係や凹面鏡の間隔を精密に解析してみる必要がある。

カーレンズ効果を起こしやすくするためにもう少し厚さのある試料を用いてみる必要がある。

SESAMモード同期においてもモード同期発振は得られたが、期待していた出力及びパルス幅は得られなかった。観測したモード同期も不安定であった。安定なモード同期を得るためにはQ-スイッチを防がなければならない。この場合は、パルスのエネルギー密度 E_p が飽和フルーエンス E_{sat} より十分大きければ防ぐことができる。しかし、 E_p はマルチパルス化の影響により上限がある。SESAMでの吸収飽和が大きいとモード同期したパルスは分割されやすくなる。レーザーの利得域を減少してしま

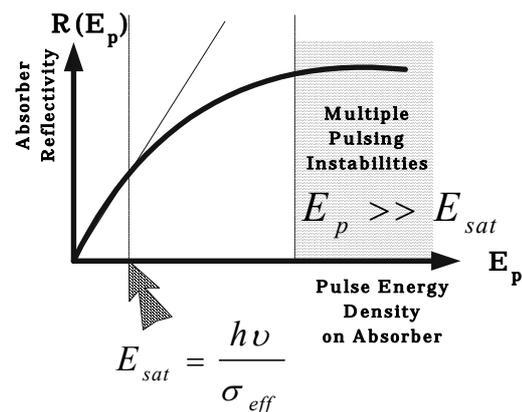


図.12 SESAMの反射率とエネルギー密度の関係

うために各パルスの平均利得も減少してしまう。あるパルスエネルギーの中に 2 つ、3 つとパルスが存在し(それぞれのパルスはパワーも小さい)てしまうので、スペクトルも狭くなってしま

る。今後は、Q-スイッチを防ぎかつマルチパルス化が起きない程度の最適な E_p を検討する必要がある。