

リング共振器を用いた Ti ドープサファイアレーザ発振器の開発

Development of a ring-type Ti-doped sapphire laser oscillator

石川 智啓 (B4)

T. Ishikawa

Abstract

An unidirectional laser mode-locking is achieved in a ring-type Ti-doped sapphire cavity. This technique is applicable in development of a high-power mode-lock oscillator in which intracavity high-order harmonic generation is set at ultra-high repetition rate..

1. はじめに

高次高調波を光電子分光計測に用いるためには、超高繰り返し・高強度な高次高調波光源が必要とされる。超高繰り返しの高次高調波光源としてエンハンスメントキャビティによるものが報告されているが[1]、共振器長の高精度な制御や搬送波包絡線位相(CEP)のロックが必要とされるため、安定化がかなり難しい。そこで、このような光源として共振器内高次高調波発生が提案された。これは高強度なレーザ発振器内のパルスを用いて高次高調波発生を行うことで、発振器の繰り返し程度で高次高調波発生を行うというものである。最近の研究では E. Seres らによって Ti:sapphire 結晶を利得媒質とした共振器内において 9.6 MHz の繰り返し数で高次高調波発生を行い、カットオフエネルギーは 30 eV に及ぶものが報告されている[2]。

以上のような背景のもとに、我々は超高繰り返し・高強度高次高調波発生光源への応用のために、リング共振器の片周りモー

ド同期の手法を検証する。具体的には、小型の Ti:sapphire レーザ発振器を作製し、カーレンズモード同期によるパルス発振の際に、レーザーパルスが共振器内を片周りする現象について確認する。線形共振器による共振器内高次高調波発生では一方向のみしか高次高調波を取り出せず、他方は基本波の減衰を引き起こす。リング共振器によるパルスの片周りを応用することで、取り出せない方向の基本波の減衰をなくすことができ、発生効率を上げることができると考えられる。

2. 共振器の設計

繰り返し数が 110 MHz 程度になるよう共振器長を設定し、曲率 50 mm の凹面鏡によって Ti:sapphire 結晶[3]に集光する共振器構造とした。ABCD 行列で共振器中のモード変化を計算し、その結果を Fig. 1 に示す。

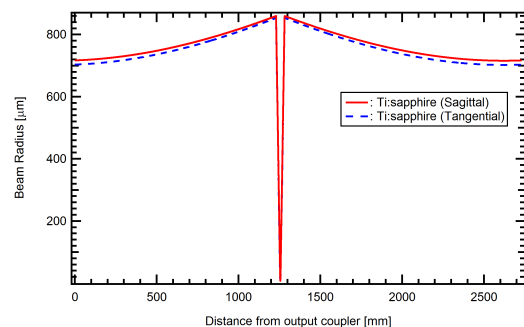


Fig. 1 Fundamental mode propagation in the Ti:sapphire laser. The red solid line shows that in the sagittal plane and the blue dotted line shows that in the tangential plane.

Fig. 1 は安定発振条件なので、図の左端と右端は出力取り出し鏡に相当し、同じモードサイズ値を持つ。結晶内における発振光と励起光のモード変化を Fig. 2 に示す。

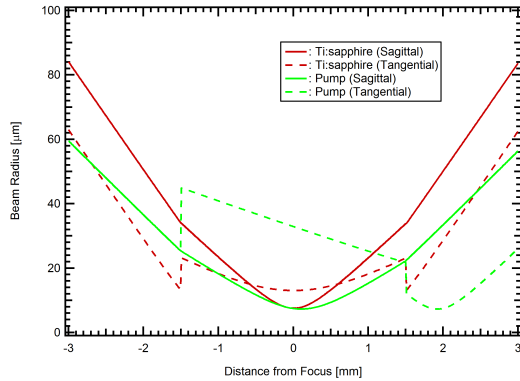


Fig. 2 Cavity mode and pump mode near the focal point. The red curve shows the cavity mode and the green curve shows the pump mode. Modes in the sagittal plane are shown with a solid curve and those in the tangential plane with a dashed curve.

実際に作製した発振器の構成を Fig. 3 に示す。

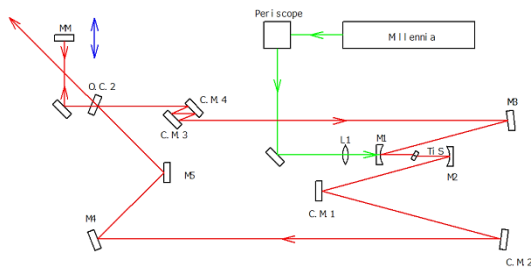


Fig. 3: Ti:sapphire oscillator having a ring-type cavity. Length of the clockwise direction is 100 mm longer than that of counterclockwise direction. Millennia: LD pumped Nd:YVO₄ CW laser @ 532 nm(SHG); Ti:S: Ti-doped sapphire crystal (3 mm thickness); C. M. : chirped mirror; O. C.2 : output coupler ($T=5\%$);

L1: lens ($f=50$ mm); M1, M2: dichroic mirror ($R=50$ mm); MM: moving mirror. Length of the cavity is 2.76 m.

この発振器は Spectra Physics 社製 Millennia Vs(LD 励起 Nd:YVO₄, CW@532 nm)を励起光源とし、利得媒質には厚さ 3 mm でブリュースタカットされた Ti:sapphire 結晶を用いた。カーレンズ効果によるモード同期を行い、分散補償にはチャープミラーを使用した。

3. 作製した発振器の性能

作製したリング型 Ti:sapphire 発振器では、連続発振時には出力取り出し鏡から 2 方向にレーザ光の出力があった。このうち、Ti:sapphire 結晶から出力取り出し鏡までの距離が短い方のレーザ光を金コートミラー (Fig. 1 における MM) によって共振器内に戻し、片周りの発振にした[3]。その条件で得られた発振器のスローブ効率と変換効率を Fig. 4 に示す。

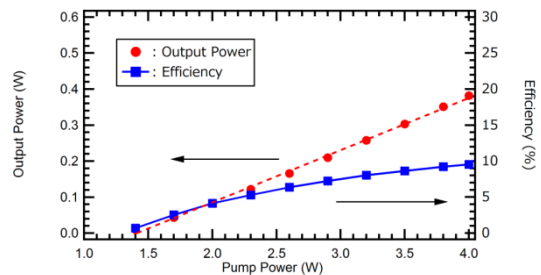


Fig. 4: Slope efficiency and conversion efficiency. The red circles show the output power and the blue squares show the conversion efficiency. Slope efficiency is 14.5%.

レーザー出力を直線でフィッティングすることによって、スローブ効率は 14.5%と

求められた．次に連続発振とパルス発振におけるスペクトルを Fig. 5 に示す．

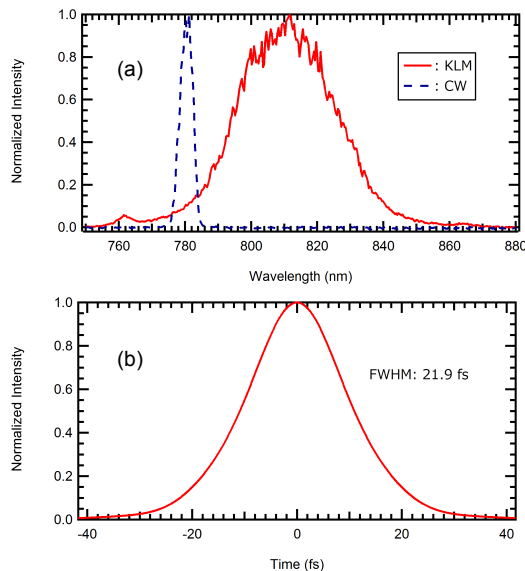


Fig. 5 (a) Mode-locked (Red solid curve) and CW (blue dashed curve) spectra. (b) Calculated Fourier limited pulse of the mode-locked spectrum showing a pulse duration of 21.9 fs (FWHM).

Fig. 5 よりモード同期を行うことで連続発振のものに比べてスペクトルに広がりが生じたことが確認できる．計算されるフーリエ限界のパルス幅は半値全幅(FWHM)で 21.9 fs になる．Fig. 6 にフォトダイオードで計測したパルス列を示す．

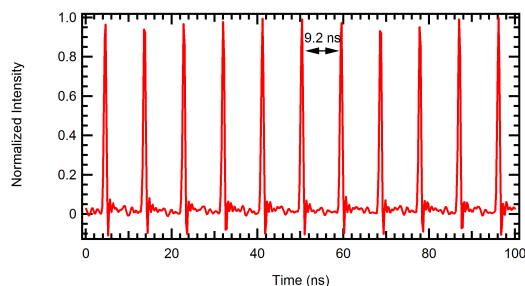


Fig. 6 Mode-locked pulse train. 208 mW output power obtained at a 3.8 W pump power.

A repetition rate of 108 MHz is obtained as expected from the length of the cavity.

Fig. 6 より共振器長から求められるパルス間隔と一致することからモード同期に成功したことが確認できる．モード同期は安定であり，振動がないかぎり，かかり続ける．スペクトルの変化を 20 分計測し，その結果を図 7 に示す．スペクトルも大きく変化せず，安定したモード同期レーザーパルスが得られている．

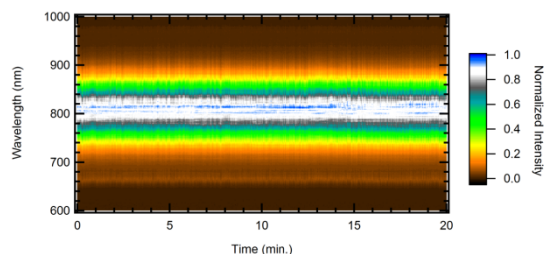


Fig. 7 Spectrum change of the ring oscillator. The data was collected one shot per 20 seconds up to a total time of 20 minutes.

4. 片周りモード同期のメカニズム

本発振器では，モード同期の際に共振器内で時計方向のみにパルスが片周りする現象が確かめられた．これは出力取り出し鏡から出力されるレーザー光の方向によって確認できた．一度モード同期がかかると定常的にパルス発振した．

このような現象が生じるのは，次のように説明できる．一般的に発振器からの出力を再度発振器に戻すと共振器が不安定になる．このことから両周り CW 発振しているリング共振器で一方の出力を戻すとその方向の出力が不安定になり，左右の発振閾値に差が生じる．この状態で移動鏡を操作

すると共振器内でノイズが発生し、発振閾値が低い方のみ片周りモード同期がかかる。そしてこの状態で共振器が CW 発振の条件よりも安定化するので、定常的に片周りパルス発振になると考えられる。

リング型発振器における片周りパルス発振にはファラデーアイソレータを用いることも可能であるが、多くの分散補償を必要とする。本技術を用いることでファラデーアイソレータによる分散をなくすことができ、超短パルス発生に関して大きな利点であると考えられる。また、ファラデーアイソレータに搭載されている TGG 結晶の熱伝導率が低く、高出力レーザーの開発には向いていない。

5. まとめ

リング共振器を用いた Ti:sapphire レーザ発振器を作製し、カーレンズモード同期を安定に行うことに成功した。本研究では、移動鏡による片周りパルス発振が実現され、大型の高平均出力レーザー共振器の開発にもこの技術を利用することが期待できる。

謝辞

本研究は理化学研究所緑川レーザー物理工学研究室主任研究員緑川克美博士に実験環境を提供して頂き、研究員鍋川康夫博士とアマニ・イランル博士の指導を受けて行われました。厚く御礼申し上げます。

References

- [1] C. Gohle, T. Udem, M. Herrmann, J. Rauschenberger, R. Holzwarth, H. A. Schuessler, F. Krausz, and T. W. Hänsch, “A frequency comb in the extreme

ultraviolet,” *Nature* **436**, 234-237 (2005).

- [2] E. Seres, J. Seres, and C. Spielmann, “Extreme ultraviolet light source based on intracavity high harmonic generation in a mode locked Ti:sapphire oscillator with 9.4 MHz repetition rate,” *Opt. Express* **20**, 6185 (2012).
- [3] A. Kasper and K. J. Witte, “10-fs pulse generation from a unidirectional Kerr-lens mode-locked Ti:sapphire ring laser,” *Opt. Lett.* **21**, 360 (1996).
- [4] P. F. Moulton “Spectroscopic and laser characteristics of Ti:Al₂O₃,” *J. Opt. Soc. Am. B* **3**, 125 (1986).