## Yb:YAG thin diskモードロック発振器の開発 (R&D status for Yb:YAG thin disk mode-lock laser oscillator)

## 日本原子力研究開発機構 小菅 淳

関西光科学研究所における次期レーザー開発プロジェクト (H22~次期中期計画)

量子制御を用いた同位体分離のための高出力THz波発生用 高効率・高出力レーザー光源の開発

開発目標:

100mJ, 1ps, 1kHz, 波長1µm帯, Flat-top空間プロファイルのレーザーを開発する



## 今後の研究について: レーザー・コンプトン・ガンマ線のためのレーザー開発



## 高効率・高出力のためのレーザー媒質

 Yb添加媒質の特徴

 長所:高い量子効率(>90%)
 高効率なレーザ発振が可能

 長い蛍光寿命(~1msec)
 パルスレーザの高出力化が可能

 蛍光スペクトル幅が広い
 サブピコ秒の超短パルス光の発生が可能

 短所:レーザー光の再吸収が起こる
 高密度励起により問題解決可能

#### 代表的なレーザ結晶の特性比較

	材料	Nd:YAG	Ti:sapphire	Yb:YAG
蛍光	蛍光波長	1064nm	660~ 1100nm	1029nm
	蛍光寿命	~0.23ms	0.0032ms	0.96ms
	蛍光スペクトル幅	0.67nm	440nm	9.5nm
	フーリエ限界パルス幅	2.5ps	2.59fs	165fs
吸収	吸収波長	807.5nm	488nm	941nm
	吸収スペクトル幅	1.5nm	200nm	21nm
	量子効率	0.76	0.55	0.91

高効率·高出力のためのレーザー媒質 → Yb添加媒質を用いる

高効率・高出力のためのレーザー形状

#### 高平均出力のためのレーザー形状

高平均出力のためにはレーザー媒質を効率的に冷却し、熱レンズ効果を低減 させる必要がある。 ロッド型:排熱が難しい Fiber型、Thindisk型:排熱が容易

•ロッド型

長所:取り扱いが容易 短所:熱レンズ効果による自己収束が起こる

・fiber型
 長所:空冷で十分冷却可能、高ビーム品質、高効率
 短所:非線形効果が起こりやすい、ASE(自然放出光の増幅)が発生しやすい
 ・Thindisk型
 長所:排熱が容易で熱レンズ効果が低減できる
 短所:利得媒質長が短い

高効率・高出力のためのレーザー形状 --> Fiber型、Thindisk型を用いる

# Yb:YAG Thindisk 高出力発振器

# Yb:YAG Thindisk 高出力発振器



★ モードロック発振の実現

繰り返し周波数に対応した共振器設計をおこない、分散補償 素子(負分散ミラー)を用いてモードロック発振させる。

CW発振の発振特性の測定

Thindiskがレーザー媒質として機能するかの確認として、1枚の凹面鏡を用いて一番 単純なCW発振器を組み、発振特性の測定をおこなった。



## Yb:YAG Thindisk モードロック発振

励起時のThindiskの曲率半径を測定することができたので、これをもとに繰り返し周波数 30MHzのモードロック発振器を設計する。



# Yb:YAG Thindisk モードロック発振器



n2: nonlinear refractive index w:ビーム半径

## Yb:YAG Thindisk モードロック発振器



## Yb: YAG Thindisk モードロック発振器の最新研究動向1

#### •Max Planck Institute of Quantum Optics F. Krausz's group

4746 OPTICS LETTERS / Vol. 36, No. 24 / December 15, 2011

#### High-power 200 fs Kerr-lens mode-locked Yb:YAG thin-disk oscillator

O. Pronin,<sup>1,\*</sup> J. Brons,<sup>2</sup> C. Grasse,<sup>3</sup> V. Pervak,<sup>2</sup> G. Boehm,<sup>3</sup> M.-C. Amann,<sup>3</sup> V. L. Kalashnikov,<sup>4</sup> A. Apolonski,<sup>1,2</sup> and F. Krausz<sup>1,2</sup>

> <sup>1</sup>Max-Planck Institut für Quantenoptik, Garching, Germany <sup>2</sup>Ludwig-Maximilians-Universität München, Garching, Germany <sup>3</sup>Walther Schottky Institut, Garching, Germany <sup>4</sup>Institut für Photonik, TU Wien, Vienna, Austria <sup>\*</sup>Corresponding author: oleg.pronin@mpq.mpg.de

Received October 17, 2011; accepted November 8, 2011; posted November 14, 2011 (Doc. ID 156488); published December 13, 2011

We demonstrate a power-scalable Kerr-lens mode-locked Yb:YAG thin-disk oscillator. It delivers 200 fs pulses at an average power of 17 W and a repetition rate of 40 MHz. At an increased (180 W) pump power level, the laser produces 270 fs 1.1 µJ pulses at an average power of 45 W (optical-to-optical efficiency of 25%). Semiconductor-saturable-absorber-mirror-assisted Kerr-lens mode locking (KLM) and pure KLM with a hard aperture show similar performance. To our knowledge, these are the shortest pulses achieved from a mode-locked Yb:YAG disk oscillator and this is the first demonstration of a Kerr-lens mode-locked thin-disk laser. © 2011 Optical Society of America

今までのThin diskモードロック発振器では、強度変調を過飽和吸収ミラー(SESAM)のみで 行なっていた。

(Thin disk上でビーム径が大きく、媒質長が短いため、非線形光学過程であるKerr lens効果が十分起こらない。)

発振器の性能がSESAMの性能で左右される。(性能のよいSESAMが手に入らない)

#### Kerr lensモードロックを目指す。

#### Yb: YAG Thindisk モードロック発振器の最新研究動向1

Kerr lens効果

共振器内に集光点を作り、1mm厚のfused silica板を 挿入し、近くにhard aperture(ピンホール)を入れ強度 変調によりモードロックがかかる。

(実際には、Kerrlens効果+SESAMによりモードロックをかけている。)

SESAMの改良 ダメージを抑えるためSASEMの最外層(GaAs)の上に 多層膜コーティング(Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>+SiO<sub>2</sub>)を行う。これにより、 SESAMのダメージ閾値は上がり、それと同時に強度 変調効果は弱まる。

モードロック・パルス

Output power: 45W, Pulse duration: 270fs (OC: 14%)
Output power: 17W, Pulse duration: 200fs (OC: 5.5%)



Fig. 2. (Color online) (a) Schematic of the Kerr-lens modelocked Yb:YAG disk oscillator. All flat mirrors except for M are high-dispersion mirrors with  $\approx -1200$  fs<sup>2</sup> per bounce; OC, an output coupler with 5.5% or 14% transmission; R1 and R2, concave mirrors with 0.3 m radius of curvature; R3, -4 m; R4, 4 m; K, 1-mm-thick fused silica plate placed in the focus at the Brewster angle; H, hard aperture (a pinhole); M, flat mirror or SESAM. The pulse repetition rate is 40 MHz. The oscillator is placed inside a box of size  $\times 1 \text{ m} \times 0.4 \text{ m}$ . (b) Beam profile in mode-locked regime and in CW regime (after mode locking has been interrupted).



Fig. 3. (Color online) Autocorrelation and the spectrum (inset) at 17 W of output power and 5.5% output coupler (measured with an APE Pulse Check autocorrelator). The time–bandwidth product is 0.34 (sech<sup>2</sup>, ideal 0.315). Kelly side-bands are visible in the spectrum wings. This measurement was performed for the SESAM-assisted KLM.

## Yb:YAG Thindisk モードロック発振器の最新研究動向 2

#### •Max Planck Institute of Quantum Optics F. Krausz's group Pump-seed synchronization for MHz repetition rate, high-power optical parametric chirped pulse amplification

Hanieh Fattahi,<sup>1,2,\*</sup> Catherine Yuriko Teisset,<sup>2</sup> Oleg Pronin,<sup>1</sup> Atsushi Sugita,<sup>1</sup> Roswitha Graf,<sup>1,2</sup> Vladimir Pervak,<sup>2</sup> Xun Gu,<sup>1</sup> Thomas Metzger,<sup>1,2</sup> Zsuzsanna Major,<sup>1,2</sup> Ferenc Krausz,<sup>1,2</sup> and Alexander Apolonski<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Max-Planck-Institut für Quantenoptik, Hans-Kopfermann-Str. 1, 85748 Garching, Germany <sup>2</sup>Ludwig-Maximilians-Universität München (LMU), Am Coulombwall 1, 85748 Garching, Germany \*hanieh,fattahi@mpg.mpg.de

Abstract: We report on an active synchronization between two independent mode-locked lasers using a combined electronic-optical feedback. With this scheme, seed pulses at MHz repetition rate were amplified in a non-collinear optical parametric chirped pulse amplifier (OPCPA). The amplifier was seeded with stretched 1.5 nJ pulses from a femtosecond Ti:Sapphire oscillator, while pumped with the 1 ps, 2.9  $\mu$ J frequency-doubled output of an Yb:YAG thin-disk oscillator. The residual timing jitter between the two oscillators was suppressed to 120 fs (RMS), allowing for an efficient and broadband amplification at 11.5 MHz to a pulse energy of 700 nJ and an average power of 8 W. First compression experiment with 240 nJ amplified pulse energy resulted in a pulse duration of ~10 fs.



Fig. 3. Block diagram of the system; CM, chirped mirror.

Optics Express 20, 9835 (2012)

## Yb:YAG Thindisk モードロック発振器の最新研究動向 2

#### 2. Mode-locked thin-disk oscillator

The pump source is based on an Yb:YAG thin-disk and long-cavity oscillator. The resonator, shown in Fig. 1, contains the Yb:YAG thin-disk (7%-doped, 200 µm-thick) used as a turning mirror. The thin-disk laser module from Dausinger & Giesen GmbH is pumped by fiber-coupled diodes at 940 nm wavelength. The pump spot diameter on the disk is 2.8 mm.



Fig. 1. Schematic of the Yb:YAG oscillator. HR, high reflector; DM, dispersive mirror; OC, output coupler; BP, Brewster plate; SESAM, Semiconductor Saturable Absorber Mirror.

A 1 mm thick fused silica Brewster plate is inserted to enforce linear polarisation. The oscillator is operating with a 12% output coupler. Passive mode-locking of the oscillator is achieved by using a commercially available Semiconductor Saturable Absorber Mirror (SESAM, BATOP, SAM-1040-1-500fs) as an end mirror of the cavity. The SESAM with a modulation depth of 0.5% is impinged by pulses with a peak intensity exceeding 4 GW/cm<sup>2</sup>. With a pump power of 260 W. 70 W of average power is obtained resulting in an optical-to-optical efficiency of 27%. In contrast to [14], the laser operates in air and delivers up to 6  $\mu$ J pulse energy at 11.5 MHz repetition rate with near-diffraction limited beam quality of  $M^2 < 1.1$  (Fig. 2), Stable single-pulse operation was obtained with –18000 fs<sup>2</sup> of negative group delay dispersion (GDD) per round-trip. The dispersion was introduced by two highly dispersive mirrors [15] with –4500 fs<sup>2</sup> GDD per bounce. At 60 W output power, the oscillator exhibits a pulse duration of 1 ps and a bandwidth of 1.4 nm (FWHM) at a center wavelength of 1030 nm (Fig. 2), The RF-spectrum indicates strong sideband suppression above 60 dB (Fig. 2) around the repetition rate frequency.

Ti:sapphire発振器とYb:YAG thin disk発 振器の同期は、Ti:sapphire発振器の中に ピエゾ素子を入れることにより行なっている。



#### 理由:

ピエゾでthin disk発振器の状態に変化を与えると、cw-mode lockingからQ-swiched mode lockingに移行してしまうため。





Fig. 2. The autocorrelation trace (left), optical spectrum (middle), the RF spectrum (right) and the beam profile (inset) of the Yb:YAG thin-disk oscillator.

# 繰り返し周波数ロック系の立ち上げ

## 繰り返し周波数ロック系の立ち上げ

● 無線通信用PLL(Phase-Lock-Loop)技術をベース
 →設計の考え方・参考文献が充実
 →低雑音の専用ICチップがラインナップ

参考: 無線装置で利用されている周波数ロック系(基本構成は同じ)



図3 PLLヘテロダイン方式

http://www.geocities.jp/beery\_bear/Products/IPD/Swallow.htmより引用



年度明けよりTi:Saモードロックレーザーをテストベンチとして立ち上げ、開発 を進めている(年度中にThin-disk laserに組み込む予定) <sub>17/21</sub>

#### 立ち上げを行ったTi:Saモードロックレーザー



#### 計測結果1(パルス列) f=89 MHz)



#### 計測結果2(スペクトル) Δλ~15nm(FWHM) (その後の調整で現在は>50nm)



今回試験的に構成した周波数ロック制御系(PLLへテロダイン式)



## 現在までの進捗

#### 結果(ジッターの評価結果)

評価方法:~25kHzの信号(周波数)を、周波数カウンター(タイムベースはFE-5680A)・

ゲート時間3種(0.01/0.1/1sec)で計測(データ数N=100)。その変移量をジッター@89MHz に換算(→評価方法は妥当?妥当性を確かめるため他の評価方法も検討(中)。良い方法が あればご教示いただければ幸いです。)

→ <u>系全体のJitter</u>(計測器由来の測定誤差は<u><0.2ps(</u>要評価方法の妥当性))



#### 現在のレーザーの開発状況

•Yb YAG thin disk発振器•

•Yb fiber CPA増幅器~

 繰り返し周波数ロック系の立ち上げ (Ti:sapphire laser)





