

招待講演

## アト秒科学のためのマルチ TW シングルサイクルレーザー光源

Multi-TW single-cycle laser source for attosecond science

○高橋 栄治 (理研 光量子工学研究センター, 理研 開拓研究本部)

Eiji J. Takahashi (RIKEN)

## 1. はじめに

高次高調波発生は励起レーザー場の半周期毎に起こる為、パルス包絡線に含まれるレーザー電場のサイクル数により発生回数決定される。マルチサイクルレーザーを励起光とした場合は発生するアト秒高調波はパルス列となり、電場の振動回数が 1~2 回程度しかない数サイクルレーザーを用いれば単一アト秒パルスを得ることができる。つまり高出力の単一アト秒パルス発生を行う為には、理想的には高強度のシングルサイクルレーザーを励起光とする必要がある。しかしながら高出力且つ電場振動が 1 回のレーザーシステムを開発することは技術的に容易ではなく、結果、単一アト秒パルスの高出力化は困難な状況が続いている。

## 2. Advanced DC-OPA [1]

2011 年に我々が考案した二重光チャープ光パラメトリック増幅法 (Dual-Chirped Optical Parametric Amplification: DC-OPA) [2] は、OPCPA 法を基にした中赤外パルスの増幅法であり、100 mJ を超える数サイクルレーザー開発において重要なレーザー増幅技術となっている。OPCPA と異なり DC-OPA ではチャープしたブロードバンドのピコ秒レーザーをポンプ光として使用する。DC-OPA は出力スケール特性に優れ、マルチ TW のピークパワーを持つ数サイクルレーザーを実現する事ができるが、非線形結晶の位相整合によって決定される増幅帯域の制限からシ

ングルサイクルレーザーの増幅には使用できなかった。

我々は 2022 年に DC-OPA を基本原理とし、その増幅帯域を大幅に拡張できる手法を開発した。Advanced DC-OPA と呼称される本手法は、DC-OPA に二種類の非線形結晶を組み合わせたユニークな構成をとっている (図 1)。それぞれの非線形結晶 (NC1: BiB<sub>3</sub>O<sub>6</sub>, NC2: MgO:LiNbO<sub>3</sub>) が担当する増幅波長域を分けることで、一つの非線形結晶ではカバーできない増幅域を互いに補いオクターブを大きく超える増幅域を可能にしている。この新手法は DC-OPA が持つレーザー出力スケール特性を損なうことなく、その増幅帯域を超広帯域化できるという画期的な特徴を有している。

## 3. シングルサイクルレーザーシステム

図 2 へ開発したレーザーシステムのレイアウトを示す。DC-OPA 法の励起レーザーには、ジュールクラスの出力エネルギーを持つチタンサファイアレーザーを使用し、1 台のレーザーから微弱シード光と DC-OPA の為のポンプ光を作り出している。DC-OPA 法においてシード光とポンプ光間の分散量 (チャープ量) と符号の関係が、増幅効率および増幅帯域を決定する重要なパラメーターとなる。そこで、シード光には音響光学素子を用いて、ポンプ光にはチャープ調整機を用いて個別に分散を与えている。付加された分散によりパルス幅が伸ばされたチャープシード

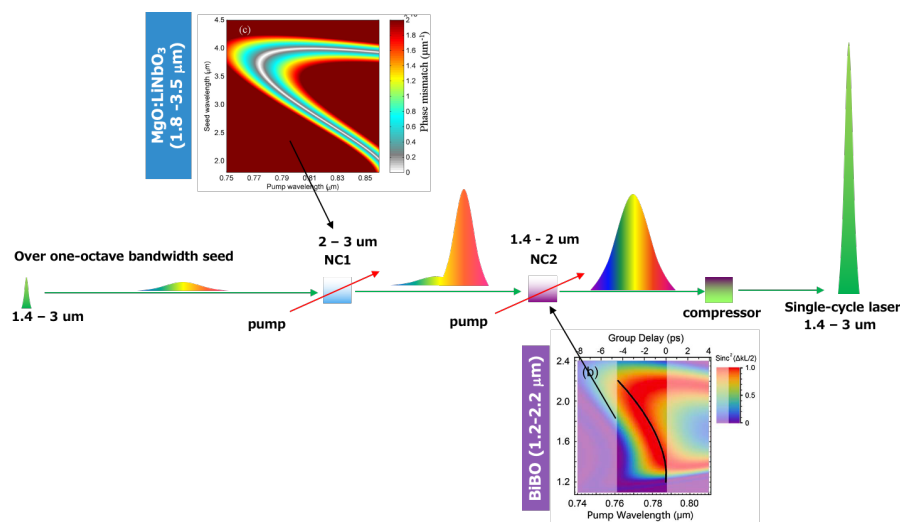


図 1. Advanced DC-OPA の概念図

## 招待講演

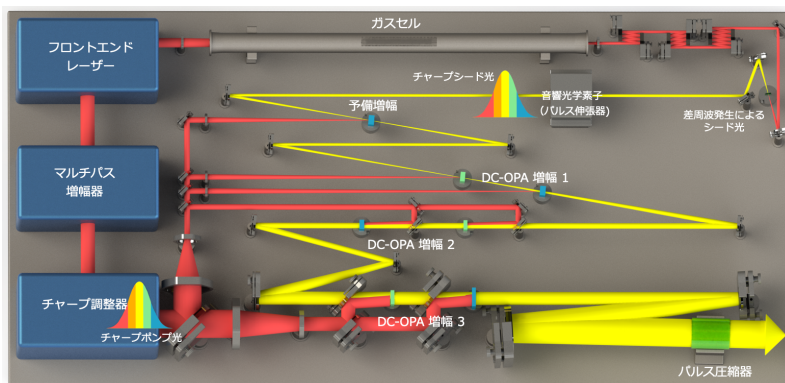


図2. TW級シングルサイクルレーザーシステム

光は  $\text{MgO}:\text{LiNbO}_3$  結晶による予備増幅段、及び  $\text{BiB}_3\text{O}_6$  と  $\text{MgO}:\text{LiNbO}_3$  結晶により構成された3段のDC-OPAを通してチャープポンプ光により増幅され、増幅後の光パルスはパルス圧縮器によりシングルサイクルにまで圧縮される。

各増幅段の増幅スペクトルを図3に示す。シード光は  $1.4 - 3.0 \mu\text{m}$  の帯域を持ち、そのスペクトル帯域を保ったまま3段のDC-OPAにより増幅される。DC-OPA増幅3の後のパルスエネルギーは  $53 \text{ mJ}$  であり、図3のスペクトル構造からその中心波長は  $2.4 \mu\text{m}$  と評価される。

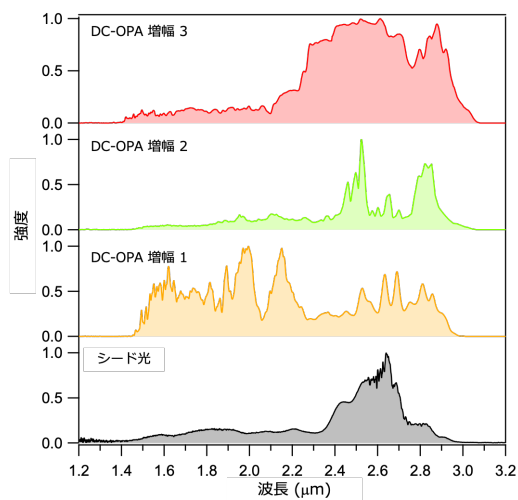


図3. 各DC-OPA増幅段の出カスペクトル

DC-OPA法で増幅された光パルスは、サファイアを用いたパルス圧縮機により音響光学素子で与えた分散量を補償され、時間圧縮される。図4は中心波長  $2.4 \mu\text{m}$  光のパルス圧縮の結果を示しており、 $8.6 \text{ fs}$  のパルス幅が達成されている。レーザー光の中心波長が  $2.6 \mu\text{m}$  であることから、そのパルス幅の中には1回の光サイクルしか含まれていないと評価できる。

この結果、中心波長  $2.4 \mu\text{m}$  の中赤外レーザ

ーにおいて出力エネルギー  $53 \text{ mJ}$ 、ピークパワー  $6 \text{ TW}$  のシングルサイクルレーザーが発生していることが明確に確認された。これらの値はシングルサイクルレーザーとして世界最高の出力スペックとなる。

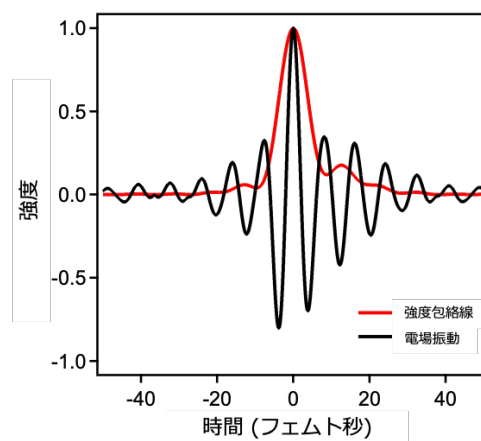


図4. DC-OPA増幅光のパルス圧縮

## 4. まとめ

本研究ではシングルサイクルレーザーをテラワット級のピーク出力にまで増幅できるレーザー増幅法の開発を行った。使用する非線形結晶や励起レーザーを変更することで、サブサイクル光パルスのテラワット増幅が可能なることも示唆されている。

## 参考文献

- 1) L. Xu and E. J. Takahashi, Nature Photonics (in press)
- 2) Q. Zhang, E. J. Takahashi *et al.*, Optics Express 19 (8), 7190-7212 (2011).