

極低温冷却による繰り返し数可変(kHz) 超短パルス・高出力 フェムト秒 Ti:sapphire レーザー

Ultrashort High-power Multikilohertz Femtosecond Ti:Sapphire Laser by Cryogenic Cooling System

泉 啓介^a, 斉藤 敬^a

Keisuke Izumi and Takashi Saito

1. はじめに

超高速マイクロマシニング, コヒーレント X 線発生, 時間分解ホログラフィ, アト秒パルスの発生などのアプリケーションから, 超短パルス Ti:sapphire レーザーシステムに対する高繰り返しかつ高パルスエネルギーへの要求がますます増大しております。本稿では, これらの要求に対する米国 KMLabs 社の技術的対応についてご紹介します。

2. Ti:Sapphire 増幅器の高出力化

2.1 極低温冷却の利点

過去 5 年間, 多くの高平均出力第二高調波 Nd:YAG や Nd:YLF レーザーが市場に投入され, 高平均出力 Ti:Sapphire レーザー増幅器の理想的励起光源として利用可能されてきました。しかし, 励起光の約 1/3 は Ti:sapphire 増幅結晶内で熱に変換されてしまう為, 結晶内の熱の取扱いが大変重要になります。この熱が直径 1mm のビームスポットに集中し大きい温度勾配が生じると, 結晶内に強い熱レンズ効果が発生します。

一方, 図 1 にあるように, Ti:sapphire 増幅結晶を極低温に冷却すれば, 電子冷却に比べ 1~2 桁大きな出力で Ti:sapphire 増幅器を励起できます。この励起光出力の増大によって, パルスエネルギーや繰り返し周波数を増大させ

ることが可能になります¹。

熱レンズを補償する方法は他にもありますが, 増幅結晶を極低温冷却する方法に比べると限られた範囲でしか成功していません。例えば, 熱レンズを光学的に補償する方法がありますが, これは励起レーザーの平均出力の変化に非常に敏感です。よって, 極低温冷却をしないシステムでは励起光出力を変える度に大幅な再調整が必要になってしまいます。更に, 光学的な補償では一般に高次の収差を排除することができず, 空間ビーム品質が低下します。これらの収差は空間フィルタリングによって減らすことはできますが, システム効率が低下してしまいます。Ti:sapphire 増幅結晶の極低温冷却は励起光出力から Ti:sapphire レーザー発振への変換効率をほぼ 2 倍にすることができます。

KMLabs 社(米国)はこのような極低温結晶冷却器を 1 段増幅システムの Ti:sapphire 増幅器"Dragon"シリーズに組み込んでいます (図 2)²。

2.2 1 段増幅システムの高出力化

さらに, KMLabs 社は最新の 1 段増幅システムの Ti:sapphire 増幅器として"Dragon-HE"を発表しました。繰り返し周波数が 1 kHz でパルスエネルギー 5 mJ, パルス幅はサブ 40 fs です。

"Dragon-HE"はポンプレーザーを 1 台のみ使用していません。結晶を極低温冷却しているため, 繰り返し周波数 1~3kHz にわたって動作可能で, 光学系の再調整無くリアルタイムで繰り返し周波数の変更が可能です。

他の同様な仕様の 2 段増幅の商用システムに比べ, よりコンパクト, よりユーザーフレンドリーで, なおかつ初期コスト及び長期メンテナンスの両面で低コストです。

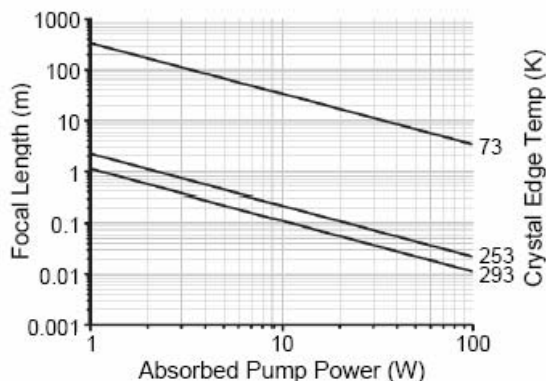


Figure 1. Thermal lens as a function of pump power focused to a 1mm spot, for a Ti:sapphire crystal kept at 77, 253, and 293 K. Thermal lensing aberrations are more than 2 orders of magnitude smaller at cryogenic temperatures.

^a株式会社東京インストルメンツ

連絡先 〒134-0083 東京都江戸川区西葛西 6-18-14

電子メール sales@tokyoinst.co.jp

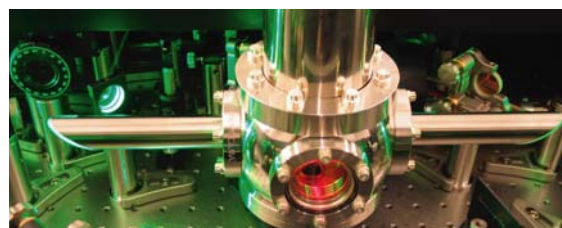


Figure 2. KMLabs' cryogenically cooled Ti:sapphire laser amplifier. The Dragon employs a hands-off, He-gas-based, closed-loop cryogenic cooler, within a sealed, ion-pump-based ultra-high vacuum chamber.



Figure 3. KMLabs RedDragon laser system that produces 25 W, 25 fs at 5 kHz. This system includes Carrier Envelope Phase stabilization.

2.3 2段増幅システムの高出力化

2段増幅システム"RedDragon"も開発しました。初段, 2段の増幅結晶とも極低温冷却されており, リアルタイムで繰り返し周波数の調整が可能です。

大出力の励起レーザーの選択により, パルス幅 25 fs, パルスエネルギー18 mJ@1 kHzあるいは4 mJ@10 kHzの出力が, 同じ装置にて可能です。さらに高繰り返し周波数として, 3 mJ@10 kHz, 0.5 mJ@20 kHzの出力も選択できます。また, 最高繰り返し周波数が必要な場合, この"RedDragon"を繰り返し数 20 kHz に最適化して 1.5 mJ@10 kHz, 1mJ@20 kHzの出力が可能です。

3. 増幅システムの CEP 安定化

KMLabs 社は, 繰り返し周波数安定化や Carrier-Envelope-Phase(CEP)安定化も提供しています。最近, 商用で最高のパルスエネルギーを持つ位相安定化フェムト秒レーザー増幅器を開発しました。

発振器と増幅器の CEP 安定化に Menlo Systems 社のフェムト秒位相安定化ユニットを使用し, エネルギー2 mJ, 繰り返し 1 kHz, パルス幅 30 fs 以下の位相安定化パルスのデモンストレーションを行いました。

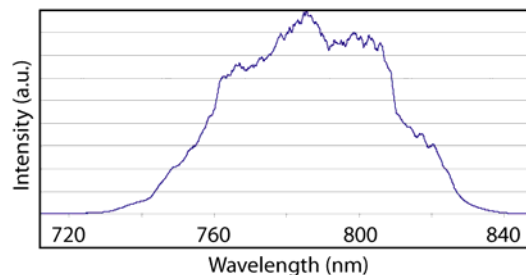


Figure 4. RedDragon output spectrum at 3 kHz, 15 W, and FWHM ~60 nm.

現在は, 到達可能な位相安定化パルスエネルギーをさらに増大し, 1 mJ@20 kHz, 3 mJ@10 kHz の位相安定化増幅器システムが製造可能です。

4. 光パラメトリック増幅器(OPA)

Ti:sapphire 増幅器"Dragon"シリーズはまた, 光パラメトリック増幅器(OPA)の良好なシード光としてもデモンストレーションされています。"Dragon"から 3.0 mJ@1 kHz のパルスでシードされた Light Conversion 社 Topas-C は 43% (1.3 mJ シグナル+アイドラー) もの高効率の発振を達成しています。

5. おわりに

本稿では, KMLabs 社の Ti:sapphire 増幅器について紹介させて頂きました。これらの製品が, より多くの研究者に使用していただき, 少しでもより最先端の科学の発展に貢献できましたら幸いです。

引用文献

- (1) Backus, S. J.; Kapteyn, H. C.; Murnane, M. M. U. S. Patent 6 804287, 2004.
- (2) Backus, S.; Bartels, R.; Thompson, S.; Dollinger, R.; Kapteyn, H. C.; Murnane, M. M. *Opt. Lett.* **2001**, 26, 465-467.

(受理日 2007年4月28日)