

青色へと向かう Ti:サファイアポンピング

クリストファー・ウッド、スターリング・バッカス、ジェフ・スクワイア、チャールズ・ダーフィー

直接レーザダイオードポンピングがカーレンズモード同期Ti:サファイアレーザに使えるようになった現在、ポンプサブシステムのコストが1/10に削減され、新世代のTi:サファイアレーザへの道も開かれた。

最近、パルスレーザ用の新しい利得材料、特にファイバベース材料が注目を集めている。これらの新しい固体レーザの最も重要な利点の1つは、レーザダイオードによる直接ポンピングが可能なことであり、それがシステムレベルの大幅な簡素化とコスト削減および信頼性向上へとつながる。

間違いなく最も重要かつ幅広く利用されているレーザ結晶の1つ、チタンドープサファイア(Ti:サファイア)はその道をたどらなかった。Ti:サファイアの場合は、500nmのピーク吸収近くの波長の光を放射する十分に強力なレーザダイオードがなかったため、他の多くの固体レーザ開発と同様のレーザダイオードポンピングの流れに倣うことができなかった。

しかし最近になって、このいちじるしく目立つ例外は、米カプテイン・マーン研究所(Kapteyn-Murnane Laboratories:KMLabs)とコロラド鉱山大学(Colorado School of Mines)の研究チームによる直接ダイオードポンプTi:サファイア超高速発振器の最初のデモンストレーションをきっかけに例外ではなくなった(図1)⁽¹⁾。ポンプレーザはTi:サファイアの歴史において重要な役割を果たしてきた。そして再びその態勢が整った。Ti:サファイアの場合、532nmの固体レーザの代わりに青色レーザダイオードで直接ポンピングすると、

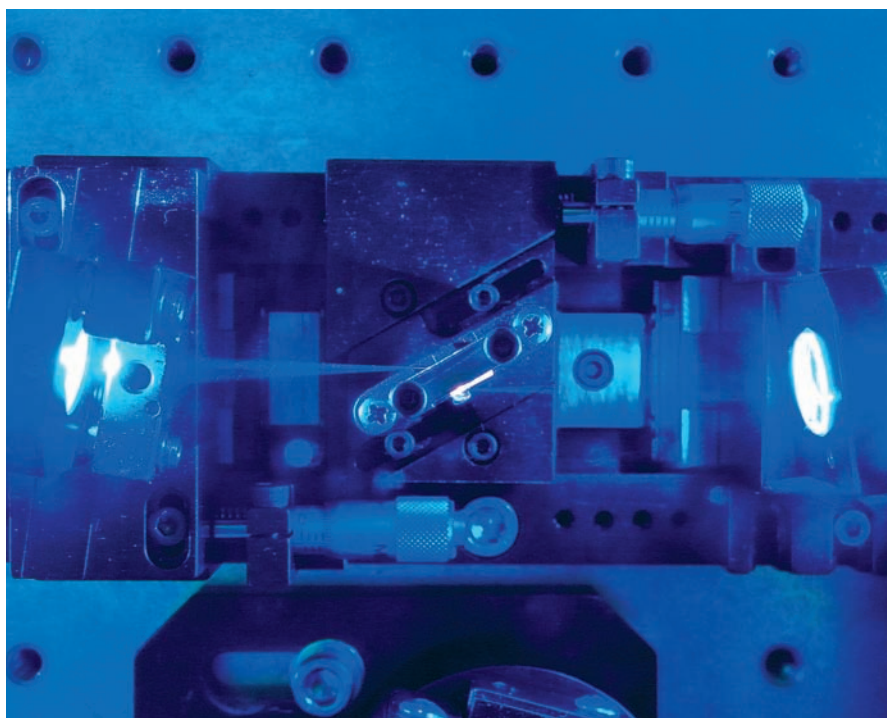


図1 ブルースターカットTi:サファイア結晶は青色ポンプダイオードからの厳密な焦点を示している。(資料提供:KMLabs)

ポンプレーザ関連のコストが約1/10に削減される。

関連市場

Ti:サファイアをレーザ結晶として有利にしている強力な組み合わせ要素が存在する。それらは、スーパー研磨と高いレーザ損傷閾値を可能にする超高硬度、高出力動作に有利な高い熱伝導率、コーティングを助け、しかも環境に耐性をもつ表面化学、ブロードな広く分離した吸収と発光バンドなどである(図2)。

しかし、Ti:サファイアが他のほとんどすべてのレーザ結晶と区別される特徴は発光帯域幅にある。この非常に大きい帯域幅(約650~950nm)は連続波(CW)実装に対して優れたチューナビリティを提供するが、さらに重要なことは、それが世界最高性能のフェムト秒発振器と増幅器を可能にしたことであり、それがTi:サファイアが強力な超高速レーザの市場を支配している主な理由でもある。

Ti:サファイアが寄与する超高速レ

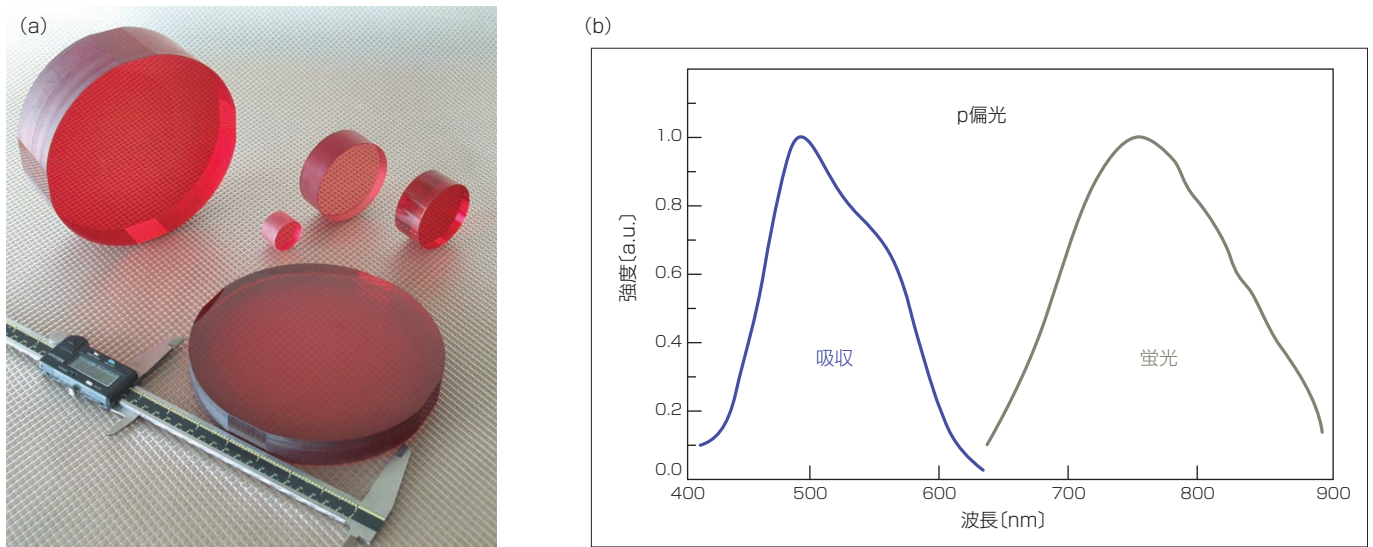


図2 Ti:サファイア結晶 (a)はブロードな広く分離した吸収と発光バンド(b)を持っている。(GTAT結晶系の画像提供: LLC、チャート提供: KMLabs)

ーザ市場には、波長とパルス幅を適切に調整できる各種の多光子顕微鏡やイメージング技術の開拓などがある。事実上、世界中のすべてのテラワットとペタワット実験は、高次高調波発生を経由するコヒーレントな極端紫外線(EUV)やX線源といった比較的新しい分野と同様に、Ti:サファイアに頼っている。

超高速分光法と光コヒーレンストモグラフィー(OCT)の科学と産業の市場は、約20年間、サブ100fsパルスを容易に生成する能力に満足してきた。研究、計測学、化学センシングなどに向けたキャリアエンベロープ位相安定化による1オクターブ光周波数コムの出現は、様々な方法でTi:サファイアから恩恵を受けている。

超短パルスから得られるピーク出力は波長変換をさらに容易にし、光パラメトリック発振器(OPO)や増幅器(OPA)などのデバイスはUVから中赤外(MWIR)をカバーする超短パルスを提供する。Ti:サファイアに適した応用は、超高速自由電子レーザーのシーディング、他のパルスレーザーシステムでは困難なこ

とが判明している材料(ダイヤモンド、炭化物、窒化物、硬質合金など)の高速マイクロマシニングなど、次々に出現している。

Ti:サファイアのそのような利点と多数の市場にもかかわらず、直接ダイオードポンピングが現在まで実証されなかったことは注目に値する。最初のTi:サファイアのデモンストレーションの直後に、研究チームは、このレーザーが当時、多量の超高速研究に使用されていた色素レーザーの理想的な代替になると認識した⁽²⁾。色素レーザーの代表的なポンプはアルゴンイオンレーザー(515と488nm線)であり、そのことはTi:サファイアでも継続された。したがって、Ti:サファイアのための高価なポンプレーザーの先例は極めて早期に設定された。

最初の周波数2倍化固体レーザー(532nm)が開発された時、それらは基本的にアルゴンイオンレーザーを置換した。しかし、より新しく、より小型な2倍化バナジウム酸塩レーザー、2倍化ファイバレーザー、または2倍化された光ポンピング半導体レーザーによってさえ、そのコスト構造は偏り、ポンプが依然と

してシステムコストの30%から50%を占めた。

直接ダイオードポンプ超高速発振器

直接ダイオードポンピングは、より低いコスト、より小さいサイズ、より低い消費電力、改善された効率、より高い信頼性などの多数の利点をもたらした。これらの利点を得た典型例は、Nd:YAG、Yb:YAG、ファイバベースシステム(主にNd、Yb、Er)などがある。その裏づけは年々増し、これらのレーザーの直接ダイオードポンプバージョンはさまざまな産業と研究領域において主流になった。

超高速レーザー(ここではパルス幅が100fs以下と定義)に関しては、直接ダイオードポンプ発振器の探索がCr:YAG、Crドープホルステライト(Cr:Mg₂SiO₄)、Cr:LiCaF、Cr:LiSGaFなどの材料研究へとつながった⁽³⁾。好都合なことに、これらの材料は入手可能なレーザーダイオードと同調する吸収バンドを持つが、いずれも幅広い適用を阻む基本的欠点ももっている。

超高速発振器のレーザーダイオードポ

ンピングとともに、重要な役割を果たすもう1つの要因は、短いパルス幅(約10fsまたはそれ以下)に対して推奨される技術、カーレンズモード同期(KLM)を安定して行うための高いビーム品質の必要性である。多くの研究はKLM物理の理解へと進み、詳細を説明するさまざまな興味深いハードとソフトのアーチャモデルが生まれた。

いかなる場合にもポンプレザのビーム品質が重要な役割を果たすとはいえ、確かに、レーザダイオードのビーム品質が相対的に低いことは周知の事実だ。カーレンズモード同期において信頼できる結果を安定して得るには強い集光が必要であり、これが主要なレーザダイオードにとって挑戦になった。

ダイオードポンピングの定義として、周波数2倍化固体レーザ用のポンプ源がそれ自身ダイオードであるとしたら、Ti:サファイアレーザがダイオードでポンプされたといえるか否かが論争になった。これは明らかに「直接ダイオード」ポンピングではない。コスト/複雑さにおいて大きく異なる。

Ti:サファイアをめぐる変化

いくつかの要因がこの最初の直接ダイオード励起されたKLM型Ti:サファイアレーザのデモンストレーションを可能にした。第1に、適切な波長(約445nm)を持つワットクラスのレーザダイオードが入手可能であることが主要な要因であったとすれば、われわれはデジタルプロジェクタ市場の恩恵を受けたことになる。商用プロジェクタ産業の生産量はTi:サファイアポンピングと関連するいかなるものもはるかに超え、この市場はさらなる開発の駆動力であり続けるだろう。

第2に、われわれは、英ストラスクライド大学(University of Strathclyde)

の研究チームが行った、いくつかの主要なデモンストレーションに注目する。そこでの最近の実験は直接ダイオードポンプされたTi:サファイアレーザとそのモード同期バージョンのCW動作を見せた⁽⁴⁾。しかし、これらのレーザはモード同期の開始と維持に、KLMではなく、可飽和ブラッグ反射体(SBR)を利用している。SBRと一連の半導体可飽和吸収体ミラー(SESAM)は、これまでのところ、発振器が発振するパルスエネルギーと幅を制限してきた。KLMはより速い基本応答、より低い損失、より高いレーザ損傷閾値をもち、それゆえ、より短いパルスを提供する。しかし、SESAMとSBR技術も改良が続けられ、KLMを統合したハイブリッド技術は非常に有望だ⁽³⁾。

第3に、ストラスクライド大学のデモンストレーションは、ビーム品質問題にもかかわらず、直接レーザダイオードポンピングを使うKLMの再度の見直しを促した。この研究は、このあと説明するように、完全に成功した。結局、超高速Ti:サファイアのレーザのコスト構造は、新たに生まれる大量商品市場が適正に受け入れられ、そして既存

の直接ダイオードポンプ固体レーザとの競争が起これば改善されるはずだ。

最初の直接ダイオードポンプ

このデモンストレーションで採用されたレイアウトは、標準的な商用KMLabsシステムに基づく発振器配置である(図3)。しかし、ここでは、このレーザは445nmを発振する2台の1.2Wシングルエミッタ青色レーザダイオードで励起された(光学系とデモンストレーションの詳細は(1)を参照)。

安定なKLM動作で最も重要な因子は、結晶内の十分に小さなスポット内に吸収されるポンプパワーを可能な限り多くすることである。最初に、レーザ共振器を周波数通倍されたNd:YVO₄レーザからのビームを使って最適化した。これによって各青色ポンプビームを独立に最適化させながら、レーザを閾値以上に保つことが可能になった。初期実験では、1つの配置がTi:サファイア結晶の両側面からのレーザダイオードポンピングを使って実現された。その後、われわれは、片側面ポンピングだが、2台のレーザダイオードを並列させて使用する、よりロバストな配置を開発した。

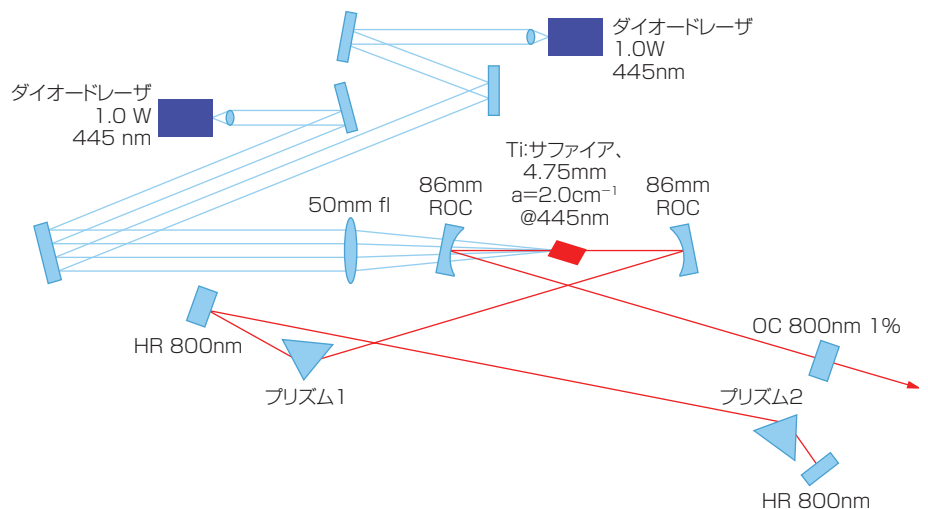


図3 1つの並列ポンプ配置がデモンストレーションに使われた。(資料提供:KMLabs)

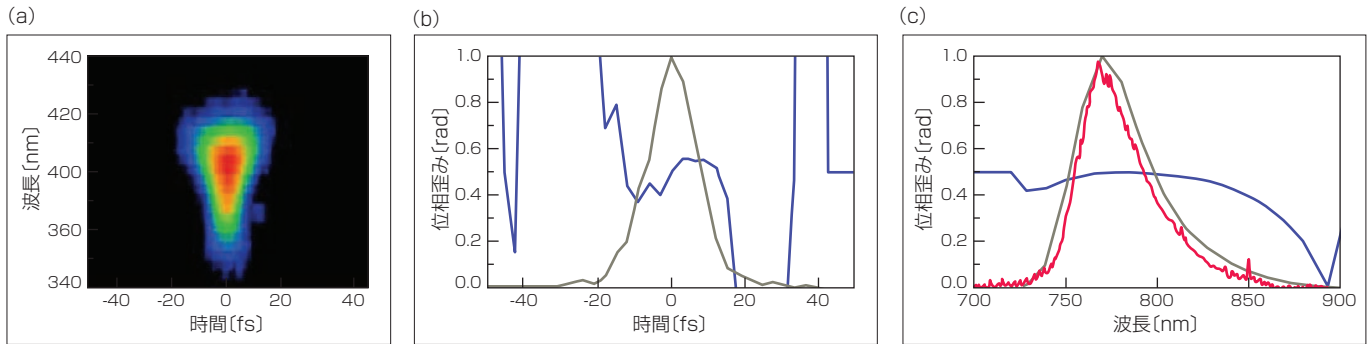


図4 FROGトレース(a)はクリーンでベデスタルなしのパルスを示している。プロットはデコンボリューションされた時間強度と位相(b)とデコンボリューションされたスペクトル強度と位相(c)を示す。赤色は別個に測定されたスペクトルである。(資料提供:KMLabs)

対向伝搬するポンプビームを使用した初期実験において、われわれは約40mW(80MHzの繰り返し周波数)のKLM出力を得ることができた。他方、同一側面ポンピングの場合は34mWであったが、その後、追加のレーザダイオードを使うことによって120mW以上の出力を達成した。この出力ビームは、出力カプラの分散を補償するために1対のチャープミラーに送られ、その後、掃引周波数分解光ゲネーティング(FROG)パルス測定システムに伝送された。

図4は時間と波長領域の強度と位相に沿ったクリーンなFROGトレースを示す。結果として生じるパルス幅は、SBRを使った時の114fsに比して、15fsであった⁽⁵⁾。さらに、出力ビーム品質は非常に優れ、測定された M^2 (ビーム品質)値はほとんど1.0に近かった。

いくつかの多少驚くべき結果がこのシステムで観測された。第1に、モード同期が中断されると、CWパワーがモード同期状態に比べて1/3に低下することに気づいた。KLM動作のこの強い優先性が高い長期安定性の原因であった。第2に、ポンプビームがわずかに1次元の回折限界であることを考えれば、この優れた共振器ビーム品質のロバスト性は予想を超える。第3に、非常に優れた共振器ビーム研究とは相対

的に、ユニークな方法(特許出願中)を使ってダイオードビームの成形と重ね合わせを行った。そして、455nm光の厳しいアラインメントが要求され、複雑で大きい損失を伴うファイバ結合の使用を回避した。最後に、初期研究で観測された寄生損失が、青色レーザダイオードポンピングを使用したわれわれの研究では全く観測されなかったことを指摘する。

影響と展望

われわれは、このデモンストレーションがTi:サファイアレーザ開発の歴史におけるもう1つの重大なマイルストーンになると確信する。特に、それは、ポンプサブシステムのコストを約

1/10に削減することを約束し、全体のサイズも低減に導くはずだ。

最近のレーザダイオードビーム結合における著しい進歩によって、10から30Wの青色レーザダイオードポンプパワーがTi:サファイアシステムで利用可能になるであろうと考えることは理にかなっている。このレベルのパワーは、高出力発振器や高繰り返し周波数(100kHz以上)の増幅器に対して也十分である。また、レーザダイオードの直接変調はCEP安定化に向けた新しく高効率な方法(特許出願中)を可能にする。新しい市場が開かれ、既存の市場もこれらのコスト削減から利益を得るであろう。新世代のTi:サファイアレーザは間違いなく誕生する。

謝辞

ここに報告した研究は契約AFOSR FA9550-10-C-0017とAFRL FA8650-11-C-2102の下で米国空軍から資金を受けて行われた。

参考文献

- (1) C.G. Durfee et al., Opt. Expr., 20, 13, 13677(2012); <http://dx.doi.org/10.1364/OE.20.013677>.
- (2) P.F. Moulton, J. Opt. Soc. Am. B, 3, 125(1986).
- (3) W. Sibbett et al., Opt. Expr., 20, 7, 6989(2012); <http://dx.doi.org/10.1364/OE.20.006989>, and numerous comprehensive references contained therein.
- (4) P. Roth et al., Opt. Lett., 34, 3334(2009).
- (5) P. Roth et al., Opt. Lett., 36, 304(2011).

著者紹介

クリストファー・ウッド(Christopher Wood)は米カプティン・マーナン研究所(Kaptein-Murnane Laboratories:KMLabs)の研究副部長、スターリング・バックス(Sterling Backus)は最高技術責任者である。e-mail: cwood@kmlabs.com. URL: www.kmlabs.com
 ジェフ・スクワイア(Jeff Squier)は米コロラド鉱山大学(Colorado School of Mines)の教授、チャールズ・ダルフィー(Charles Durfee)は準教授である。URL: www.mines.edu.