

高出力ウルトラファーストレーザにおける熱レンズ効果の抑制

トニー・カラム、ウラジミール・ペルバック

パルス幅が短くピーク出力が高いウルトラファーストレーザシステムは、材料加工から顕微鏡法に至るまでの幅広い用途にメリットと改善をもたらす。

ウルトラファーストレーザシステムは、材料加工の他、医療用レーザ、半導体検査、非線形イメージングや顕微鏡法でも活用されている。これらの用途に押し上げられる形で、ウルトラファーストレーザの出力はますます高まっているが、この技術は、熱レンズ効果などの熱効果に特に敏感である。

熱は蓄積し、利得媒体や共振器内部の光学素子の屈折率変化や、変形を引き起こす場合がある。その影響によって、ウルトラファーストシステムの性能が妨げられ、モードロックやパルス生成が不可能になることさえある。また、熱レンズ効果は、レーザ共振器に非点収差を引き起こす。しかし、新しい高分散の共振器内ミラーコーティングは、熱効果を最小限に抑えることができる。この技術進歩は、熱効果が無視できる共振器内光学素子の開発を可能とし、最高水準のウルトラファース

トレーザシステムの実現を促進する。

このような種類のシステムは、レーザ共振器の外側で使用される外部光学素子にもメリットがある。例えば、高エネルギーでウルトラファーストの発振器や増幅器に使われる光学素子である。熱レンズ効果を抑制する技術を採用する外部分散ミラーは、熱による悪影響を最小限に抑えつつ、ビーム安定性とパルス圧縮に対する高い制御性を備える(図1)。

熱レンズ効果

熱レンズ効果は、レーザシステムのビーム品質と出力に制約を与える。高出力で動作するシステムでは、その影響が特に顕著で、ウルトラファーストレーザシステムの場合は、モードロックやレーザパルス生成ができない状態 Continuous Wave (CW) モードで動作して、共振器アライメントを行う。そ

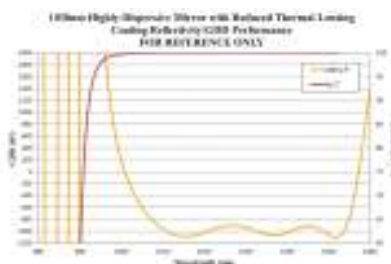


図2 030nmのレーザ向けに設計されたこのミラーは、熱効果が無視できるレベルに抑えつつ、高いスペクトル性能と分散補償性能を維持した。

の後、実際の使用に向けてパルス波設定に切り替えられるが、熱レンズ効果によって、この設定におけるモードロックやパルス生成が妨げられる可能性がある。

熱レンズ効果は、レーザ共振器のアライメントずれを引き起こし、望ましくないレーザモードを生成し、ビームの向きをドリフトさせ、レーザ共振器に非点収差を引き起こす恐れがある。そうしたすべての効果が、最終的なシステム性能を低下させて予測不能とし、ウルトラファーストレーザの高出力を妨げる可能性がある。熱膨張によって、光学部品が変形し、ミラーの曲率半径が変化する可能性もある。この変形は、ミラーの焦点位置をシフトさせ、共振器のアライメントずれを引き起こして、ウルトラファーストシステムのモードロックを妨げる可能性がある。

パルスビームが生成できなければ、ウルトラファーストレーザは無用とな

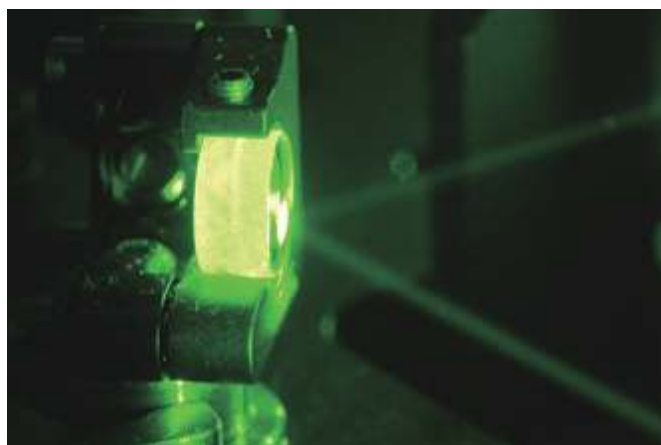


図1 熱レンズ効果を抑制するように設計された、高分散ミラーコーティングは、高出力ウルトラファーストシステムで使用した場合に、共振器の内部と外部の両方の光学素子にメリットがある。この図に示したのはその一例である。

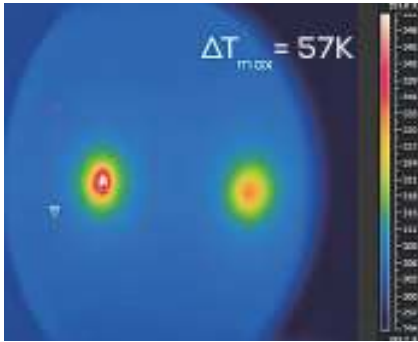


図3 熱レンズ効果抑制コーティングを施していない高反射ミラーの温度変化は57,000で、新しいコーティングを施したミラーよりもはるかに高かった。このミラーにより、システム性能は低下した。

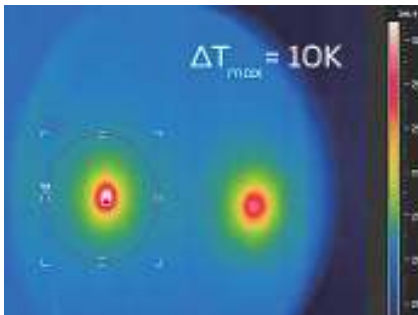


図4 GDDが -1000fs^2 の熱レンズ効果抑制ミラーの温度変化は1万だった。このミラーによる、検出可能な性能低下は観測されなかった。

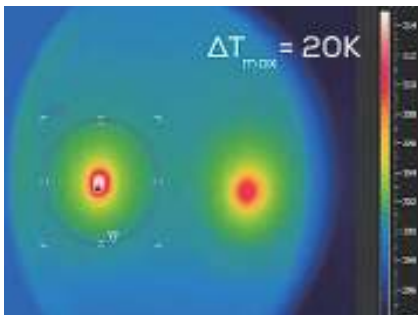


図5 GDDが -3000fs^2 の熱レンズ効果抑制ミラーの温度変化は2万で、このミラーによる検出可能な性能低下は観測されなかった。

る。利得媒体や光学部品基板の本質的な熱特性を操作するために適用できる手段は多くないが、適切な分散ミラーコーティングを慎重に選択することにより、熱レンズ効果を抑制することができる。

特殊な高分散ミラー

誘電体コーティング設計の進歩によ

り、熱効果を見逃すレベルに抑えつつ、高い反射性と所望のパルス圧縮を維持する、高分散ウルトラファーストミラーの開発が最近可能になっている。コーティング蒸着時のさまざまなプロセスパラメータを慎重に操作することによって、そのような特性の組み合わせが達成される。熱安定性の確保は重要だが、それと引き換えに、分散ミラーの高い反射率と十分な負群遅延分散(Group Delay Dispersion: GDD)が損なわれてはならない。ほとんどの光学媒体が正のGDDを示すため、それを補償し、パルスを圧縮して特定用途によって求められるパルス幅を得るために、分散ミラーは負のGDDを持つ必要がある。

図2は、新しい熱レンズ効果抑制コーティングを採用した、1030nmの高分散ミラーの反射率とGDDを示している。この新しいコーティング技術は、Yb:YAG、ツリウム、ホルミウムのレーザーシステムなど、高出力の固体ウルトラファーストレーザーに有効である。

熱性能試験

これらの新しい分散ミラーコーティングを試験して、熱レンズ効果のレベルを判定した。Yb:YAG薄ディスクレーザー内部の共振器内分散ミラーの温度を、赤外線カメラ(FLIR SC305)によって測定した。レーザーは、モードロックを達成する前にCWモードで動作するため、CWモードで試験した。熱レ

ンズ効果抑制コーティングを施していない、GDDが -3000fs^2 の標準的な高反射ミラーの場合、温度は50K以上上昇した(図3)。この温度変化により、発振器の安定性が低下し、照射レーザーモードに変更が生じた。

次に、熱レンズ効果抑制コーティングが施されている、GDDが -1000fs^2 と -3000fs^2 の高分散ミラーを、同じ実験設定で試験した。これらのミラーの温度変化は、それぞれ1万と2万だった(図4と図5)。温度のカラースケールが図によって異なることに注意してほしい。新しいコーティングを施したミラーには、検出可能な熱効果は観測されなかった。モードと発振器の安定性は維持され、レーザーシステムは意図したとおりのモードロックと機能を達成することができた。

しかし、すべてのウルトラファーストシステムにこの技術が必要というわけではない。チタンサファイア(Ti:sapphire)レーザーは一般的に、平均出力が十分に高く、熱レンズ効果は深刻な問題とはならない。ファイバレーザーシステムには、熱による悪影響が生じ得る固体レーザー共振器が含まれていない。これらに対しては、新しい熱安定性に優れたコーティングを使用しない、高分散光学素子で十分である。一方、Er:YAG、ホルミウム、ツリウムレーザーなど、高出力の固体ウルトラファーストレーザーには、熱レンズ効果の抑制が不可欠である。

参考文献

- (1) O. Pronin, "Towards a compact thin-disk-based femtosecond XUV source," Dissertation an der Fakultät für Physik der Ludwig-Maximilians-Universität (2012).

著者紹介

トニー・カラム(Tony Karam)は、米エドモンド・オプティクス社(Edmund Optics)のウルトラファースト製品ラインマネージャー、ウラジミール・ペルバック(Vladimir Pervak)は、独ウルトラファースト・イノベーションズ社(UltraFast Innovations)の光学コーティング担当責任者。

e-mail: tkaram@edmundoptics.com, pervak@ultrafast-innovations.com

URL: edmundoptics.com, ultrafast-innovations.com

LFWJ