高出力レーザー用補償光学系

植田 憲一

電気通信大学 レーザー極限技術研究センター (〒182-8585 東京都調布市調布ヶ丘1-5-1)

Adaptive Optics for High Power Lasers

Ken-ichi UEDA

Institute for Laser Science, University of Electro-Communications, 1-5-1 Chofugaoka, Chofu, Tokyo 182-8585

(Received November 20, 1998)

Adaptive optics systems for high power gas lasers and solid state lasers are reviewed. Large scale deformable mirrors with magnetostrict actuators were cooled by water for use with huge output infrared lasers. The simple mirrors which are deformable by the hydro pressure were applied to adaptive resonators for thermal lens compensation with solid state lasers. A silicon wafer mirror was proposed as an automatic adaptive resonator for LD-pumped YAG lasers. New techniques employing a spatial phase modulator, phase-conjugated mirrors, and hybrid laser crystals are introduced.

Key Words: Deformable mirrors, Actuator, Spatial phase modulator, Phase conjugation, Hybrid laser crystals

1. はじめに

光の波面制御を行う補償光学(以後アダプティブ光学と記述する)の有力な応用分野の一つは高出力レーザーであった。特に軍事研究目的に開発された巨大出力レーザーでは、レーザー共振器用光学系やレーザービーム伝送用の光学系にアダプティブ光学系が利用されてきた。しかし、最近では加工用の高出力レーザーが固体化され、熱レンズ効果を補償するためのアダプティブレーザー共振器など、新しい時代のアダプティブ光学系が開発されつつある。本論文では、高出力レーザー用のアダプティブ光学系について紹介する。

2. 高出力炭酸ガスレーザー、化学レーザー

連続的な出力の高出力レーザーの代表的なものは、ガスダイナミックレーザーや化学レーザーである。いずれも発振波長が赤外域で長波長が特徴である。そのために、まさに熱線レーザーとして開発されており、ミラー材料は金属反射鏡である。赤外線領域では誘電体多層膜のような高反射率ミラーはできないので、約2%の吸収が存在する。しかし、もしレーザー装置の出力がメガワット級になると、2%の吸収でも20kWの熱入力が定常的に存在することになる。したがって、熱的破壊も深刻であり、同時に熱変形を避けることができない。このため、熱変形を補償できるアダプティブ光学系^{1,2)}は巨大出力レーザーにとって不可欠の技術である。熱変形をできるだけ避けて、同時に熱破壊

を防止するためには、光学基板の材料の選定から考慮する必要がある。これまでに用いられている材料は、Cu, Be, SiC, Si, Moなどである。Cuは熱伝導に優れた金属基板であるが、重量が重く、研磨特性がよい。大型光学系では自重による自己変形が深刻なので、比重が小さいというのは重要な特性である。最近ではダイヤモンド研削機の性能が向上し、大型光学基板を直接製作することも可能である。Beは軽量、熱伝導の両面から理想的な材料であるが、きわめて有毒な材料なので、粒子飛散を防止するため研磨過程などを完全隔離する必要がある。米国などでは工場内に減圧した特別の工場が造られている。

アダプティブ光学系によく用いられるハニカム構造は、表面積を大きく拡大するので、それ自身で冷却能力が大きくなる。しかし、それだけでは不十分で、特別の冷却機構のついたものもある。水冷された大口径アダプティブミラーでは口径4.5mまでが製作可能だという。ミラーの外観は冷却機構や駆動機構によってさまざまだが、いずれも薄板で作られた光学ミラーの背後に多数のアクチュエータが並んでいる。ユニークな材料を紹介すると、ミラー基板それ自体を多孔質、発泡材料にして、それらを貫通する水路に冷却水を流して冷却するものもある。基板そのものに冷却機能を持たせて、それ自体を全体として変形させようというものである。さらに、極端な例では、レーザー用ミラーの背面に水滴を含む空気を衝突させて、水滴の蒸発熱によって冷却しようというもののまでである。これらは、ミラー基板そのものの温度が高温で使うことを前提としており、高温に耐える材料でミラーを構成すれば、冷却能

率そのものは室温動作に比べて温度が高い分だけ向上させることができる。

赤外レーザー用の光学素子にとっての問題は、光学素子の熱暴走である。半導体やイオン結晶のような光学材料では、素子温度が高くなると、電子が熱励起されるので、それによる吸収係数の増大がある。この過程は、レーザー光の吸収→温度上昇→電子励起→吸収増大→熱入力が増大→さらなる温度上昇→吸収増大というように、レーザー光の吸収から温度上昇の過程で正帰還がかかるので、帰還利得が1を超えると、熱暴走が起こってたちまち光学素子の破壊に至る。

巨大出力レーザー用のアダプティブ光学では、光学素子が巨大なので piezo 素子以外の駆動距離が大きなアクチュエータも開発されている。Fig.1はその一つで、コイル構造の磁歪型素子³⁾である。磁歪素子で作成したコイルに磁界発生用のコイルを2重螺旋状に巻き付けて、磁界強度に比例した変位制御を行う。磁歪効果の大きな新材料(TERFENOLD)のViederman効果を利用した平板状スプリング⁴⁾のアクチュエータも開発された。

大口径ミラーにおける問題点の一つは機械的振動に弱く、焦点スポットが振動することである。このようなスポットダンスを補正するには、駆動部の高速応答性を考慮する必要がある。Fig.2はその結果であるが、数10Hz以下の振動は完全に補正されており、意外とアダプティブ光学系による制御が有効であることを示している。このことからすると、より小さな光学系を制御すれば、アダプティブ光学系による描画も不可能ではないといえる。ビーム掃引と同時に収差の自動補正が必要なので、難しい問題があることは間違いないが、アダプティブ光学系による直接描画は将来の重要なテーマである。さらに、光学的防振台の困難は低周波振動の除去にあることを考えると、防振性能の不足を集光光学系自身で補正することは考えてよい。

アダプティブ光学系における駆動素子間の相互干渉の影響や、アクチュエータの数や配置の最適化については、理論・実験両面からの研究が行われている。薄膜の変形は

Fig.1 Magnetostrictive spring-style actuator.

Fig.2 Vibration isolation of optical image by adaptive optics.

理論的に解明され、理論に基づいて多数の駆動装置を制御するための最適化アルゴリズムはよく解明されている。効率のよいアルゴリズムの開発により、現在のパソコンレベルでリアルタイム制御が可能になりつつある。

3. 高出力固体レーザー用アダプティブ光学系

高出力固体レーザーは先述の気体レーザーと違って、ビーム口径が小さいのが特徴で、パワー密度が高い。さらに、固体レーザーの特長として、高励起入力条件では熱レンズが発生するので、Fig.3のように熱レンズを補償できるアダプティブ光学系が望まれる。我々は熱レンズを補正するためのアダプティブ光学系を設計製作し、実際にフラッシュランプ励起固体レーザーに適用⁵⁾した。その構造はガラスの厚板基板を穿って、厚さ250ミクロン、口径9mmの薄板部分を形成したものである。薄板部分の表面は光学研磨を施し、高反射率の誘電体多層膜をコートした。薄板部分の背後に水を導入し、ピストンで圧力を印加することで薄板ミラーを変形させる。手動のピストンで制御するため、泡を導入して圧力緩和を行った。圧力変形ではパスカルの原理が成立するので、薄板部分にかかる圧力は一定で、周辺の固定端の付近をのぞけば、基本的に球面的な変形をすることが原理的に分かっている。したがって、

Fig.3 Cross section of deformable glass mirror with pressure control.

ビーム径の小さな固体レーザー用の光共振器で、熱レンズ補正を行うためのミラーとしては十分である。50Hzの放電駆動の小型YAGレーザー（ロッド径6mm、長さ60mm）を使って実験を行った。結果をFig.4に示すが、共振器条件はa:平面共振器、b:Variable Reflectance Mirror (VRM) 共振器、c:平面ミラーとアダプティブミラー、d:VRMとアダプティブミラーである。25Wまで出力は励起入力に比例して増大した。しかし、集光強度でビーム品質を評価すると、通常の平面共振器の場合、出力増大しても集光強度は低いレベルで飽和してしまう。すなわち、レーザー出力が増大しても、利用できるパワーは変化しない。一方、アダプティブ共振器にして、熱レンズ効果を含めてミラー曲率を補正すると、出力増大はそのまま集光強度に反映し、高出力とは高強度を意味するという本来のレーザー高出力が実現できる。これらの事情は、出力ミラーに反射率分布を与えたミラーを用いたときも同様に成立した。もちろん、熱レンズ効果が極端に強くなり、共振器の安定条件を外れるようなことがあると、レーザー出力そのものが減少することが観測される。

高反射率ミラーにアダプティブミラーを応用する場合、ミラー基板が透明である必要はない。そこで、シリコンウェハをミラー基板としたアダプティブミラーを考案し、試作した。Fig.5のようにシリコンウェハの背後にシリンドラを組み込んで、背面板をネジで駆動するカセット構造とした。手動でも、モーター駆動でも、水圧で変形させるミラーができる。レーザーの出力強度が最大になるように、自動制御をかけることも可能である。ガラスの薄膜ミラーからシリコンウェハに変えた場合の意味は何だろう。半導体製造技術の進歩は、近い将来に半導体製造基板の表面精度が光学面になることを予想させる。その場合、光学研磨の費用がほとんど不要になるという利点がある。シリコンの熱伝導はガラスの150倍で背面水冷はより効果的となる。さらに、シリコン基板は精密エッチングで背面加工することが可能で、機械定数を分布させることで熱レンズ効果の非球面項の補正も不可能ではない。実際、熱レンズ補正に必要なアダプティブ光学系は、あらゆる

Fig.4 Beam intensity characteristics of adaptive laser resonator.

Fig.5 Si wafer deformable mirror with precision motor drive.

る条件に対応するものでなくても、最大パワーの条件で熱レンズを補正し、集光強度の高い出力を発生できれば役割を果たしたといえるので、最適条件を絞り込んで、それに対応した設計をしたシリコンウェハミラーは十分な価値を持つといえる。さらに、モーター駆動部を外して背面のねじで曲率を制御する曲率可変ミラーはそのままミラーホルダーに組み込まれ、むしろこのようなカプセルを含んだミラーが将来のミラーのあるべき形といえるかもしれない。LD励起YAGレーザーを使って、集光強度とミラー曲率の関係を求めた結果はFig.6の通りである。最大集光強度を与える条件から判断すると、自動的に最適化できるレーザー共振器を利用するには出力安定度がよいレーザーでなければ難しいことが分かる。その意味で、共振器の自動制御はLD励起固体レーザーに適した方式である。

4. 超短パルスレーザー用位相補償光学 ホログラフィック光学素子と液晶空間位相変調器

短パルスレーザーに应用すると、パルス幅の中で波面計測し、その波面を補正することは困難である。しかし、核融合用レーザーのように多段の増幅システムを持つ大型レーザーシステムでは、多数の並列ビーム間の位相乱れを補正したり、ショット毎の熱歪みを補正する静的なアダプティブ光学系に意味がある。多段の増幅システムでは、各増幅器の特性の差による波面のずれが避けられない。計

Fig.6 Focusing power vs mirror curvature of adaptive cavity.

測された波面歪みを計算機プログラムで補正すれば、多数のビームの収束点における光学強度を向上できる。

一方、ピークパワーに比較してパルスエネルギーの小さな超短パルスレーザーでは、よりダイナミックな液晶空間位相変調器が利用されている。多段増幅超短パルスレーザーシステムで、3波シェアー干渉計で波面を計測し、解析結果を光伝導性のBSO結晶をコーティングした液晶空間位相変調器に反転投影して補正すると、直前のパルスで観測された位相歪みを使って集光特性を改善できる。液晶は600nmより長いところでは透明である。空間分解能は液晶の厚みと同じくらいで、20から100 μm である。光学的に電界を誘起させて、分割電極を用いないために、回折という問題を生じないという利点がある。

5. 位相共役光学系とビーム結合

アダプティブ光学には変形制御光学素子による波面制御のほかに、非線形光学を用いたものがある。位相共役光学系がそれで、高強度のレーザー光を位相共役媒質、たとえば気体や液体に集光すると、媒質中に発生する誘導ブリルアン散乱(SBS)によって光の波面と結合した音波がたつ。その場合、音波とは媒質の密度変動であるので、光波動と結合した屈折率分布が生じる。これは光波動が自ら形成した周期的屈折率分布、すなわち回折格子である。自己形成回折格子によってブレイズ反射を起こせば、つねに入射方向に光を反射させることができる。これによって、反射される光ビームは、入射光に比べて伝播ベクトルだけが反転した位相共役波となるので、途中の経路で発生した光学擾乱をすべて逆行補正できて、強度だけが増大した光を光源位置で再現できる。

典型的な位相共役光学系の応用例⁶⁾をFig.7に示すが、レーザー発振器から出た光は4本のビームに分けられた後、おのおの2パス増幅器に入射し増幅される。増幅器で1パス増幅後、4本のビームは位相共役セルに入射して、SBSミ

ラーで反射された後、2パス目の増幅をして波長変換され、望遠鏡に入射して上空に向かって発射される。この場合、SBS媒質としては、 N_2 ガスが用いられたが、ガス中の微粒子を完全に除去して、高強度レーザー光の集光時に絶縁破壊を起こさないようにした。同様の処理は液体媒体の場合にも行われ、高い反射率を示すSBS媒体、フロリナートでも微粒子除去は特性改善に重要な役割を果たした。ガラスファイバ⁷⁾がSBS位相共役鏡として利用できることが実証され、簡便で安定な位相共役光学系として期待されている。位相共役光学系を利用すると、多束のファイバレーザーなどで発振した多数のレーザービームを結合することが原理的に可能になると期待される。しかし、ファイバ内における偏光回転などの影響を考えると、通常の位相共役光学系では、それはスカラー位相共役なので、偏光まで含む位相共役波を発生することはできない。ただし、より複雑ではあるが、4光波混合型のベクトル位相共役ミラー⁸⁾によってビーム結合を行うことも可能になりつつある。

6. ハイブリッドレーザー結晶

ハイブリッドレーザー結晶⁹⁾の考え方は、一面でアダプティブ光学の対局にあるが、他方では物質そのものの中にアダプティブな特性を内包すると考えることができる。たとえば、 $\text{Nd}^{3+}:\text{YVO}_4/\text{SVAP}$ ハイブリッドレーザーは、熱レンズ効果 $dn/dT > 0$ と $dn/dT < 0$ の結晶を組み合わせ、レーザー媒質全体としての熱レンズ効果を補償するものである。2つのレーザー媒質の熱レンズ効果、熱伝導係数、吸収係数をTable 1に示した。LD励起の場合、端面励起によって吸収される励起パワーは正確に計算できるので、

$$\frac{1}{f} = \frac{P_h \, dn/dT [1 - \exp(-\alpha L)]}{\pi K_c \omega_p^2}$$

の関係を使って、吸収係数 α 、熱伝導係数 K_c 、ビーム半径 ω_p 、励起熱入力 P_h 、屈折率の温度依存性 dn/dT から求めることが

Fig.7 Multi-amplifier laser illuminator with SBS beam combining mirror.

Table 1 Constants related to the thermal lensing effects of hybrid crystals.

	$dn/dT (\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C})$	$K_c (\text{W/m.K})$	$\alpha (\text{cm}^{-1})$
Nd:SVAP	- 8	1.7	5 (1 wt.%)
Nd:YVO ₄	+ 8.5	5.1	33.6

Fig.8 Nd:SVAP/YVO₄ hybrid laser crystals for thermal lens compensation.

できる。熱レンズ効果補償から計算すると、Fig.8のようにSVAPとYVO₄の熱レンズ効果は1:2の割合である。端面励起による球種効果を計算して、厚さ0.8mm(Nd:SVAP)と1mm(Nd:YVO₄)の結晶を用いて実験を行ったところ、発振波長のわずかに異なるこれら2種類の結晶は、光学的に結合した状態で単一のレーザー媒体として発振した。その時のスロープ効率は54%であった。これは単独のレーザー結晶の発振と同等である。励起半導体レーザーの波長を変化させて両者の吸収量を変化させてビーム広がり角の変化を測定したところ、熱レンズ効果が補償された条件でもっとも小さなビーム広がり角が測定された。このよう

に、光学的に結合したハイブリッドレーザーは熱レンズ効果を補償しつつ、レーザー媒体からのエネルギー引き出しは有効に行うことを実証した。

7. まとめ

レーザーはコヒーレント光源であり、波面の揃ったレーザー光を発生する。したがって、レーザー光の機能を最大限に利用するには、波面を正確に制御できるアダプティブ光学系が不可欠である。当初、軍事や天文学という特殊な分野で発達したアダプティブ光学技術も、波面観測技術、アクチュエータ、制御回路、そして計算機的发展によって、より一般的なレーザー技術として利用可能になりつつある。それと同時に、波面制御、すなわち光の空間周波数の制御はそれまで考えてきたよりもはるかに難しい技術課題であり、我々は本当には3次元空間波動を制御することはまだ不十分だということも教えてくれる。21世紀はレーザーを本当に利用する時代になるが、光源であるレーザーとアダプティブ光学技術は、不可欠のパートナーとして発展させられる時代になると期待している。

参考文献

- 1) V. V. Apollonov, V. I. Borodin, S. A. Brynkskikh, S. A. Chetkin, S. V. Muravèv, and S. N. Temnov: *Exp. Tech. Phys.* **37** (1989) 41.
- 2) G. V. Vdovin and S. A. Chetkin: *Sov. J. Quantum, Electron.* **20** (1993) 167.
- 3) V. I. Aksinin, S. A. Chetkin, V. V. Kijko, and S. V. Muravèv: *Opt. Eng.* **32** (1993) 447.
- 4) S. Chetkin and K. Ueda: *Proc. Actuator 94*, June 15-17, 1994, Bremen, Germany, p.29.
- 5) S. Chetkin and K. Ueda: 電気学会光・量子デバイス研究会資料 OQD-94-6 (1994) 39.
- 6) B. Dane, K. Zepata, and L. Hackel: *J. Quantum Electron.* **31** (1995) 148.
- 7) H. Eichler, J. Kunde, and B. Liu: *Opt. Lett.* **22** (1997) 495.
- 8) M. Bowers, R. Boyd, and A. Hankla: *Opt. Lett.* **22** (1997) 360.
- 9) D. Shen, A. Liu, J. Song, and K. Ueda: OSA Annual Meeting, ThH4, Baltimore, Oct. 8, 1998.

レーザーワード

deformable mirrors

変形可能な反射鏡一般を指す。薄板またはメムブラン(薄膜)状のミラーに外部から力を加えて必要な表面形状を作り出す。変形させるための方法には、ピエゾ素子、静電力応用、磁歪素子、圧力制御など、ミラーサイズ、試用環境、

応答時間などによって様々な方法が用いられる。波面計測と連動して、連続的に波面制御ができる場合はアダプティブ光学として知られている。(植田 憲一)

誘導ブリルアン散乱(SBS: Stimulated Brillouin Scatter)

レーザー光のように強い電磁波を媒質中へ入射すると、入射光によって散乱光および自然に存在する音波のうち、位相整合条件(運動量保存)を満たすモードが励起され、散乱光が増幅されて振動分極が発生する。結果として後方散乱光が強くと励起される。これがSBSである。この媒質中に発生する密度分布は、音波の波長を周期とする規則的な粗密波であり、入射レーザー光に対して回折格子(ブラッグ

反射体)として作用する。非線形媒質中で発生した過渡的回折格子のパターンは、入射光の時々刻々変化する波面と同じパターンを生成することから、入射光と反射光の波面は共役関係となり、位相共役光が実現される。90%近い反射光はエネルギー保存則から音波周波数だけダウシフトした周波数を持つが高出力レーザー用の位相共役鏡の代表例である。(吉田 英次)