

反射光学系の恩恵を受ける撮像システム

ニコラス・ジェームス

反射光学系は高いパワーを広い波長スペクトルで処理することが可能であり、より単純で低成本の屈折光学系の代替方式になる。

伝統的な光学系の設計はレンズの屈折性に依存しているが、レーザ波長の広い範囲の動作を必要とするマルチスペクトルの用途では、レンズを用いるシステムは大きな欠点を示す場合がある。一方で、高いパワーを広い波長スペクトルで扱う場合は、反射光学系が単純で低成本の選択肢になる。

屈折レンズをレーザ集束やマルチイメージングの用途に利用しようとするとき、その設計は二つの大きな困難に直面する。その一つは事実上すべての媒質に存在する分散特性であり、そこではレンズを通過する光の速度が波長に依存して変化する。分散は入射した光のさまざまな波長が同一の場所に集光することを妨げる。この問題は複合レンズを使用することで、つまり異なる光学特性をもつ複数の材料を適切に選択し、それぞれの分散が相互に打ち消されるように組合せることによって解決できる。

しかしながら、このアプローチは可視光、近赤外線(NIR)、短波長赤外線(SWIR)などの特定領域内の限定されたスペクトルバンドでしか使えない。バンドが広くて複雑な補正が必要になる光学系は、より多くのレンズを用いた構成が必要になる。このような複雑構造のアプローチによる屈折光学系は、設計と作製に必要となる時間とコストの制約ばかりでなく、レンズ材料の化学的性質と多数のレンズの必要性のた

めに、その光透過の範囲が基本的に制約される。

このことは屈折光学系に対する二つの欠点、つまり光吸収の問題を引き起こす。高パワーレーザ集光システムは、非常に小さい比率の光エネルギーが吸収されても、レンズは突発故障に遭遇する場合がある。従来の解決策はレンズ材料とコーティング材料を選択し、レーザ波長の透過率を最大にすることであった。

残念なことに、マルチスペクトル動作と高いレーザパワーの両方が必要になると、この二つの解決策では相互補完ができなくなる。屈折光学系は波長帯が広くなると、反射防止コーティングの極端に高い透過率の維持能力が大幅に低下する。したがって、従来のレンズ系は、限定されたマルチスペクトルまたは高いレーザパワーに対して動作するものしか作製されず、両者を同時に満足させることはできなかった。

必要となる多重レンズ

このジレンマに内在するコストがとくに影響するのは、生産時のフラットパネルディスプレイの検査とリペアの応用においてである。この応用はフラットパネルの全面を可視光で走査して不純物と欠陥を探し、欠陥がいったん認識されると、1064nm Nd:YAGなどの高出力レーザを使用した欠陥のアブレーションが行われる。この用途に適

用できる単一光学系はIRと可視のスペクトルの透過率が高くなければならない。また、この光学系はIRと可視の両方の光を同一の場所に集光し、欠陥を信頼性のあるレーザの標的にする必要がある。

このように複雑で要求の多いレンズ系は、広いスペクトルを透過できる材料が見出されたとしても、高価なものになる。したがって、今までの解決策は、2組の複合対物レンズ系を使用することであった。第1の複合対物レンズ系は可視光の走査に使われるが、この場合は、アラインメント用のHe-Neレーザを組合せ、そのスポットも同一のレンズ系を通して投影する。He-Neレーザのスポットが欠陥にアラインメントされると、レンズ系を実装したモータ駆動のタレットが回転し、可視光用の対物レンズ系は光路から離れ、レーザアブレーションを行うNIRレーザ用の対物レンズ系に置き換えられる。

このアプローチは2組の複合対物レンズ系とモータ駆動タレットを使うため高価になり、保守費用も高くなる。また、NIRレーザ用の対物レンズ系は可視レーザ用の対物レンズ系と同一の場所に焦点を結ばないため、欠陥だけのレーザアブレーションを保証するには、光学系のアラインメントが重要になる。

反射光学系は基本的に反射鏡が波長に依存しないため、この用途に対して少数の光学部品で対応できる。焦点は

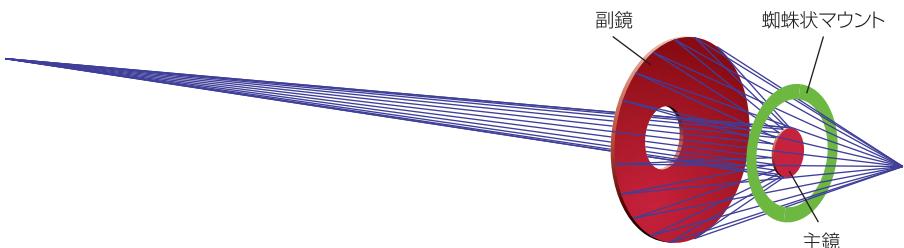


図1 反射光学系はわずか2枚の反射鏡と支持構造を使用して、広いスペクトル範囲の画像を色収差なしに結像する。

幾何学配置だけから決まり、多数の光学部品による補正を必要としない。反射光学系の反射鏡の反射率だけに依存する光のスループットは波長に依存するが、その依存性は強くない。10 μm、20 μmまたはそれ以上のスペクトル範囲をもつ反射金属コーティングを適用できるため、反射鏡は深紫外(DUV: 150 nm)から長波長赤外線(LWIR: 20 μm)を超える波長までを扱うことができる。高いレーザパワーからの熱蓄積を回避するための超高反射率が必要になる場合は、反射鏡に特殊なレーザコーティングを施して、使用レーザ波長の光のスループットを最適化すればよい。このコーティングは、残りのスペクトルにわたって、システム性能に重大な影響を与えることなく行うことができる。

代表的な反射光学系は、焦点を結ぶ主鏡と光路を好都合な方向に変換する副鏡を含めたわずかな部品から構成され、副鏡は「蜘蛛」状の支持具によって保持され、全体の光学組立部品は金属筒の内部に収納される(図1)。このような支持具は光学的にシンプルな部品から構成され、そのコストは反射光学系よりも低くなる。また、軽量かつ堅牢に作製されるため、かなりの高さから落としても損傷することではなく、再調整も必要にはならない。また、反射鏡はそれぞれが光を反射した後、光学軸の方向を変えるため、光学系はさ

らに小型化化することが可能になる。

フラットパネルの検査とリペアに使われる反射光学系は魅力的なシステム設計を行うことができる。この設計は2組ではなく、1組の対物光学系を使用するため、モータ駆動の部品が不要になり、光学系の全体寸法が小さくなる。モータが不要になることによってシス

テムと保守の両方のコストが低減し、対物光学系の交換が不要になるため、スループットが向上し、生産性が改善される。光学系が簡素化されることは、必要な場合の光学系の修正が容易になることを意味している。これらの利点を組合せると、反射光学系の投資回収率は屈折光学系の場合よりも大幅に向上する。

設計上の配慮

マルチスペクトルに応用する反射光学系は、その設計と装置が屈折光学系よりも簡単になる。しかしながら、対物反射鏡を決めるときはいくつかの考慮が必要になる。第1に、対物反射鏡の方式、つまり固定式と可調式のいずれ

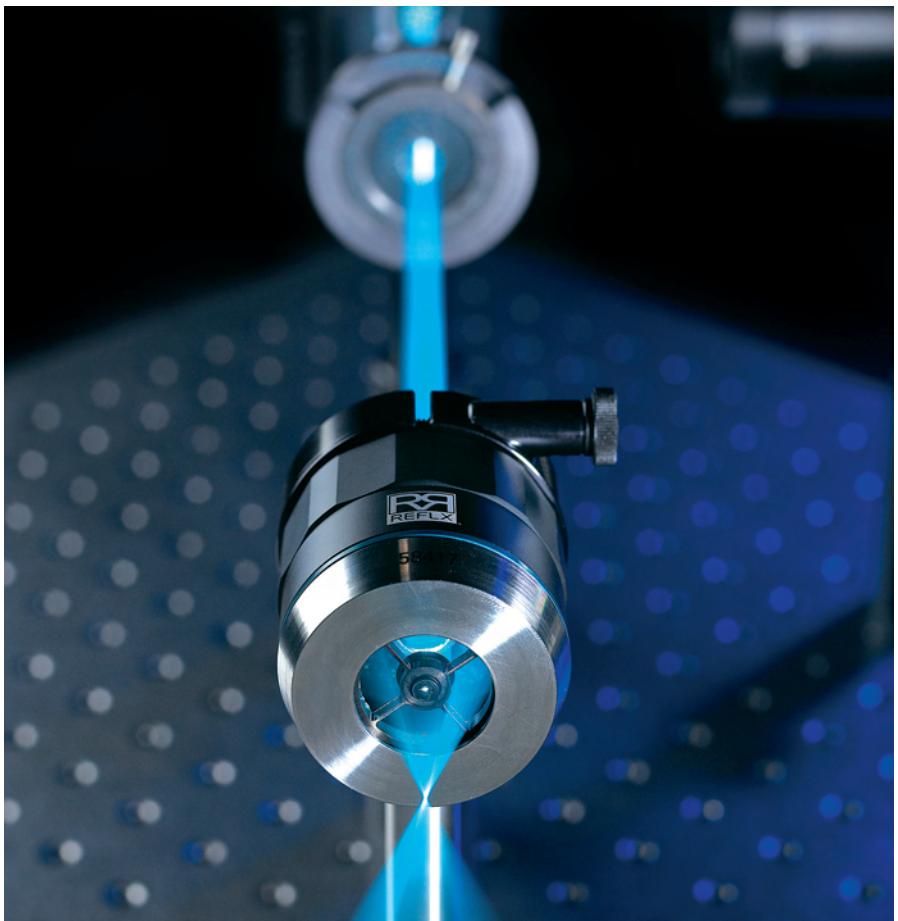


図2 ここで示すような固定式の反射対物光学系は、レンズ系の部品よりも簡単、堅牢、小型の構造を使用して、生物医学用の高パワー青色レーザビームを集光している。

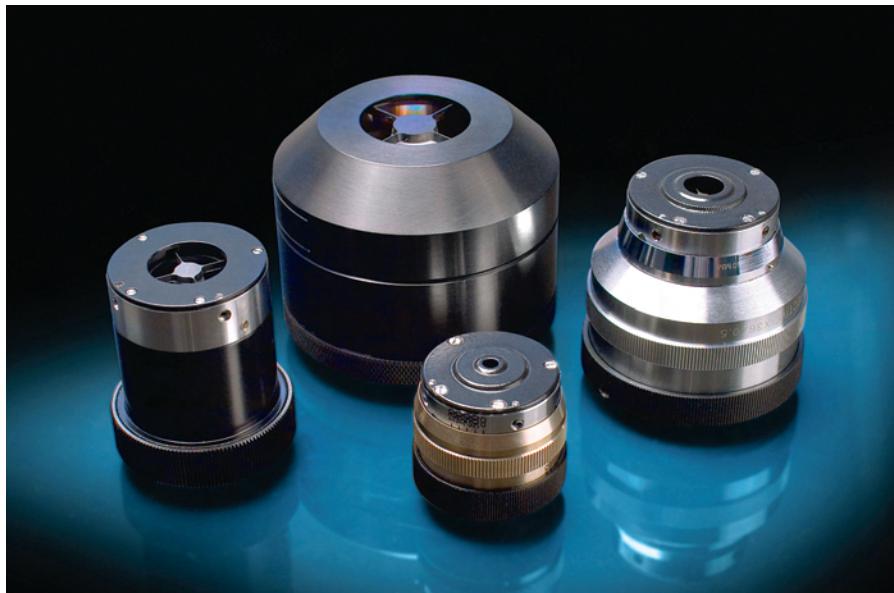


図3 調整可能な反射対物光学系は、汎用性のある設計を採用し光路を変更して、特殊な要求を満たす。

を使用するかを決めなければならない。固定式の対物反射鏡は生産工場において調整が行われ、その後は理想的な最高性能が得られる配置に維持される。装置はロバストになり、振動と偶発的故障に対する耐性が確保されるため、連続的な再較正は不要になる(図2)。また、対物反射鏡は堅固に配置されるため、可調式の装置に比べるとロバストになり、適当な距離からの落下や転倒がおきても壊れることはない。

固定式の対物反射鏡は装置の長期にわたる変更の必要がない過酷な動作条件下的産業用途に適している。対物反射鏡を特定する場合、開発者は必要となる共役距離、つまり金属筒の作動長さを無限にするか有限にするかを決め、カバーガラスを発注する場合はその厚みを決定しなければならない。作製がいったん完了すると、その後、対物反射鏡を調整する術はなくなる。

可調式の対物反射鏡は二つの方法、つまり、金属筒の作動長を調整可能する方法とカバーガラスによる球面収差の補正を変更する方法の一方または両

方を用いて調整が行われる(図3)しかし実際には、対物反射鏡の内部での主鏡と副鏡の間隔だけの変更が行われる。装置の供給メーカーから出荷される可調整式の対物反射鏡は最適の状態に設定されているが、同時に、再調整法の説明書とアライメントスライドなどの必要な部品も提供される。装置を入手したユーザは部品を組立て、金属筒を回して、必要な作動長の設定とカバーガラスによる収差補正を行い、最後に、装置を簡単にアライメントして確実に固定すればよい。

可調式の対物反射鏡は定期的な調整が必要になるが、複数の配置で動作する汎用性の高い設計を採用することができる。例えば、調整可能な市販の対物反射鏡は、金属筒の長さとカバーガラスの厚みを標準よりも少なく設定すると、特殊なニーズに合わせた利用が可能になり、専用の対物反射鏡を使う場合の付加コストが不要になる。

固定式、可調式のいずれであっても、反射対物光学系を購入する際は、いくつかの考慮が必要になる。とくに副鏡

とそれを支える蜘蛛足のために不明瞭になる画像サイズの考慮が重要になる。主鏡の光路のなかに副鏡が存在することは、光学系を進行するビーム／画像の一部の避けることのできない遮蔽の原因となり、伝達されるエネルギーの減少とビーム品質の劣化をもたらす。蜘蛛足は回折効果を引き起こし、とくに4本の直線状の脚を使用する設計では回折効果の影響が顕著になる。4本の直線状の足に対称性があると、足の相互間の回折効果が強くなる。3本の湾曲した蜘蛛足を使用する設計では、湾曲による回折効果がより均一に広がるため、回折によるエネルギーの不均一性が抑制される。

レーザ反射対物光学系を用いる場合はレーザパワーも考慮しなければならない。一般に、反射対物光学系は基礎的な金属コーティングが標準的に施されており、多数の用途に適しているが、高出力レーザの場合には必ずしも適切な選択とはならない。出力レベルが高い場合は、必要なレーザ損傷の閾値に対応できるレーザコーティングが施された製品を使用すればよい。このような製品は、対物光学系の種類に応じて簡単にカスタマイズを行うことができる。

反射対物光学系は多数の用途に応用できる能力を備えている。例えば、レーザアニールや穴あけの場合は、可視光による標的合わせとIRパワーデリバリを容易に組合せることができる。薄膜測定系は一組の光学系を使用して190nm～1μmまでの波長帯を測定できる。また、撮像システムはセンサの光学系を取替えなくても、すべての波長範囲で動作する。

著者紹介

ニコラス・ジェームス(Nicholas James)は米エドモンド・オプティクス社(Edmund Optics)の生産ラインマネージャ。
e-mail: njames@edmundoptics.com