

最適レーザービームエキスパンダの選択法

オリビア・フェールベルク

ビーム拡大は多くのレーザーシステムで重要である、したがって超過コストなくして適切な性能を達成するために必要なビームエキスパンダを正しく仕様化することが成功のために不可欠である。

歯科から材料加工まで、個々のレーザーアプリケーションには独自の性能要件がある。波長、光パワー出力、時間特性および他の重要性能特性で、レーザーは変化する。多様なビーム径や発散角のレーザーファミリを造ることができるが、他の性能要件に基づいてレーザーを選択し、所望のビームや発散角を達成するためにレーザービームエキスパンダを利用する方が、たいていいつでも容易である。

ビーム径を大きくすることに加えて、ビームエキスパンダはレーザービーム発散角も少なくする。光源ごとのビーム変動の補償に使われることもよくある。ビーム拡大率、パワー、つまり倍率が、ビームエキスパンダ選択の際に用いられる主要な仕様だが、いずれもビームエキスパンダ特性として注意深く規定しなければならない。おのおのの仕様が設計と製造の複雑さに影響を与えるからである。特殊アプリケーションのニーズは、市販の製品、市販品の改良、あるいはまったくの特注設計のレーザービームエキスパンダで満たされるかもしれない。システム要件全般がビームエキスパンダの仕様を決めるのである。

ビームエキスパンダの選択は、他の光学部品の選択と同様に細部に注意を払う、またそれが所与のレーザー性能を強化し、所定のアプリケーションでパフォーマンスを改善することができる。システムに固有の要件があるかもしれ

ないが、特注ビームエキスパンダは必要でないかもしれない。ここが、改良した市販のビームエキスパンダ、あるいは市販システムでも考慮すべきところである。

ビームエキスパンダの基本

その名が示唆するように、ビームエキスパンダは、入力ビームが大きな径になるように拡大する光学系である。ビームエキスパンダの設計コンセプトは、望遠鏡設計の基本原則から来るものである。コリメートされたレーザービームがビームエキスパンダの片側に入力されると、コリメートされたビームが反対側から出力される。つまり、物体空間と像空間光線が無限遠で一点に集中する。この特性が、無限焦点系としてのビームエキスパンダを規定している。

2つのタイプの無限焦点ビームエキスパンダがある。これらは歴史的先例にちなんで名づけられている。ケプラー式のビームエキスパンダは、2つの収束レンズを持ち、その焦点距離の和によって配置される。コリメートされた入力ビームは、2つのレンズの焦点に収束し、次に出力レンズに逸れる。ガリレオ式のビームエキスパンダは、1つの発散レンズと1つの収束レンズで構成されている。先ほどと同様に、レンズは、それらの焦点距離の和で配置されているが、この場合は発散レンズが負の焦点距離を持っている点で異なっている。発散レンズへの入力ビーム

は、光路の途中で一旦焦点を結ぶことなく、収束レンズに伝搬する。

ビーム拡大率は、ビームエキスパンダの基本的な性能パラメータである。ビーム拡大率は、出力レンズと入力レンズの焦点距離の比に等しい。レーザービームが拡大率 m で拡大するとき、ビームの発散角の大きさは逆数、 $1/m$ を乗じる。たとえば、ビームエキスパンダ拡大が2なら、出力ビーム径は入力ビーム径の2倍に、それに対して出力ビームは入力ビームの発散角の $1/2$ になる。反対に、逆に用いると、ビームエキスパンダは、出力ビーム径を小さくすることになる。しかし、逆に用いた場合、発散角度は増加する。ビームエキスパンダを逆に使うことはできるが、そのような利用は極めてアプリケーション依存になる。増加する発散角度がシステムによっては有害になるかもしれないからである。

レーザービームエキスパンダは、ビーム径と発散角度を制御する。これらの特性は、最適システム性能を目的にコリメーションを扱うシステム設計者に役立つ。ビーム発散制御は特に、長い伝搬長にとって重要である。そうした状況では、遠方のビーム径が、ビームエキスパンダの利用で小さくなるのが一般的だからである。

特性の選択

レーザービームエキスパンダは、干渉計、レーザー加工機、計測、リモートセンシングおよび多くの他のアプリケーションで用いられる。各アプリケーションは、ビームエキスパンダ選択に影響する特別な要件を持っている。ビー

ムエキスパンダ選択の適切な出発点は、システムのレーザ光源に関連する仕様のすべてを集めることである(図1)。

合理的な出発点は、入力レーザビーム径である。各レーザビームエキスパンダには、最大入力径がある。これはオプティクスや筐体の物理的な限界に関連していることが多い。ビームエキスパンダを使用する第1の目標は、たいていの場合、特定出力径を達成することである。したがって、所望の出力径がビームエキスパンダの最大出力径よりも確実に小さいことが重要である。

ビームエキスパンダには、その上、設計入力径がある、これは一般的には最大入力径よりも小さな径である。ビームエキスパンダの光学性能は、ここで最適化される。ビームエキスパンダの設計入力径が実際の入力ビーム径に一致するとき、システムパフォーマンスは最適化される。

どんな光学系でも同じことだが、ビームエキスパンダのパフォーマンスは波長の関数で変化する。内部オプティクスや反射防止 (AR) コーティングの材料グレードが、ビームエキスパンダの透過特性に影響する。AR コーティングは、設計波長で損失を減らし、さらにレンズ材料と表面形状は所定の波長に最適化されている。光学性能は、ビームエキスパンダの設計波長に最適化されているので、レーザ光源の設計波長、もしくはそれに近い波長でビームエキスパンダを選択すべきである。

透過波面誤差は、ビームエキスパンダの出力でビーム品質を数量化する。回折限界性能は、ほとんどの場合、 $1/4(\lambda/4)$ 透過波面として数値化される。より高品質の透過波面が可能であり、最高 $\lambda/8$ あるいは $\lambda/10$ までも仕様化されることがある。システムの必要に合った波面品質を選択すべきである。

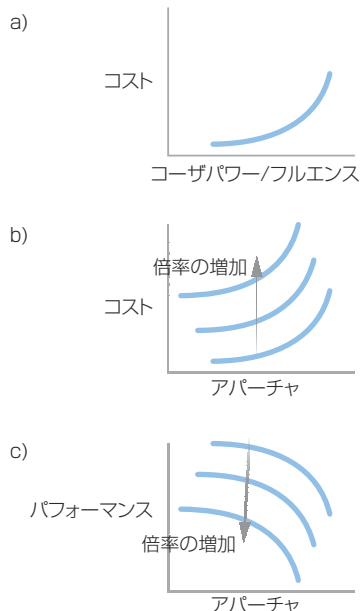


図1 レーザエネルギーが増すにつれて、より高い品質と精度の光部品およびコーティングの必要になるため、ビームエキスパンダのコストが上昇する(a)。入力アパーチャサイズの増加により、入力アパーチャの拡大すると急速にビームエキスパンダのコストが増加する。収差の非線形依存は入力ビーム径に効いてくるからである(b)。固定設計では、入力アパーチャの増加は、パフォーマンス低下につながる。収差が波面を支配し始めるからである(c)。

ビームエキスパンダには、多くの多様な固定および可変拡大オプションがある。固定拡大ビームエキスパンダはコリメーション調整を持つことがあり、一般には「焦点」または「発散」調整と言われている。これによってビームエキスパンダから出るレーザビームのコリメーションと発散の補償が改善される。

可変拡大ビームエキスパンダは、拡大率とコリメーション調整の両方の制御に便利である(図2)。これは特に、プロトタイプング中に可変でき、システム要求の微調整に役立つ。あるいはソースビーム径のバラつきを補償する。調整メカニズムを詳細に研究すべきである。回転しないレンズ調整機構であればビームのふらつき問題がなくなる。発散、コリメーション調整が必要なシステムには、焦点調整を備えたビームエク

インテグレーション
を容易にする

コンパクトな デザイン

TECHSPEC®

DA YAG レーザー用
ビームエキスパンダー



- $\lambda/10$ までの透過波面精度を実現
- 出射ビームのピント調整機構搭載により、入射ビームの発散性を補償
- Nd:YAG レーザーの発振波長用にデザイン
- 合成石英製レンズを採用

▶ 今すぐお問い合わせください

Edmund
75 YEARS OF OPTICS

www.edmundoptics.jp/097-8150

スパンダの選択を考慮すべきである。

レーザ損傷はシステムレベルでの別の懸念事項である。レーザのピークパワー（CWレーザ）、あるいはピークエネルギー密度（パルスレーザ）は必ず評価すること、またそれを表示のレーザ誘導損傷しきい値（LIDT）仕様と比較すること。特殊システム用に選択したビームエキスパンダのLIDTは、パフォーマンス継続が保証された光源のLIDTよりも大きくなければならない。光源が完全にCWなら、LIDT要件評価では他の損傷メカニズム、ホットスポット（高温点）などを考慮すべきである。

レーザアパチャから出るビームは常にある程度発散するが、それがアプリケーションにとって正しいサイズとは限らない、またそれは特にユニットごとに変動する。的確な光部品の選択に時間を使うことは、生産の遅れや追加コストの回避に役立つ。全てのアプリケーションにとって完璧なビームエキスパンダは存在しないので、組込用にコンポーネントを決定する際は、システム仕様やアプリケーション要件の考慮が必要である。

レーザビームエキスパンダは一般にガリレオ設計である。つまりビームは光路途中で焦点を結ばないということである。ガリレオ設計は比較的小さいコンパクトであり、システム組込が容易である。ケプラー設計は、中間焦点を持ち、焦点で空間フィルタリングが可能である。とは言え、中間焦点で、空気がイオン化する可能性があり、これはエネルギーロスやパルス歪の付加につながる。

高レベルの発散は、レーザ測距などのアプリケーションではパフォーマンスの制約となり得る。レーザシステムには、レーザ光源に起因するある程度の発散はあるが、光学トレインの光部品に起因する場合もある。レーザビー



図2 これらの可変ビームエキスパンダは、倍率の変更が必要なレーザアプリケーションで用いられる、たとえばプロトタイピング、研究開発。（提供：エドモンド・オプティクス社）

ムエキスパンダの組込によって、ビーム発散を低減することができる。

ビームエキスパンダ最適仕様

レーザシステムは、医療処置から材料加工までの産業で一般的なアプリケーションになっている。レーザビームエキスパンダは、こうしたシステムの成功に不可欠の要素となることが多い。ハイパワー光源では、ビームエキスパンダを採用することで、パワー密度を制御し低減することができる。さらに、発散の抑制がアライメントに役立ち、ビームの最終焦点におけるスポットサイズを小さくする。コリメーション制御のための発散低減は、特に長い光路長のシステムなど、要求の厳しいレーザアプリケーションでメリットがある。可変レーザビームエキスパンダは、製品ごとのレーザ光源ビームの変動補償に必要なことがある。

メーカーは、幅広い在庫レーザビームエキスパンダを製造している。エドモンド社のLC（ローコスト）YAGレーザ用ビームエキスパンダなど、ものによっては経済的な価格で回折限界パフォーマンスを提供することがある。システムの波長で在庫品がない場合、隣

接波長の在庫ビームエキスパンダの性能を評価すべきである。たとえば、システムが642nmで動作するなら、おそらくサプライヤーは、設計波長633nmで他のすべての要件に適合する在庫ソリューションを持っている。完全特注アセンブリを検討するよりも、在庫ビームエキスパンダのコーティング部分だけを変えるソリューションのほうが簡単である。こうしたセミカスタム製品変更は、システムの要件を満たす経済的なオプションを提供することがよくある。

システム要件がカスタム設計を指定しているなら、広範なストックオプションを持つ製造パートナーを選ぶべきである。既存の光学的、機械的設計は、カスタム設計の出発点として役立ち、コストを最小化しパフォーマンスを最大化することができる。

システム要件が、さまざまなビームエキスパンダ選択特性の優先事項を決める。ビームエキスパンダを仕様化するとき、条件を付けすぎないように注意する必要がある。これは不要なコストにつながり、物理的な形状が大きくなる可能性がある。逆に、レーザビームエキスパンダに中途半端な仕様で記述されていないかを確認すべきである。これは、不十分なコリメーション、比較的大きなスポットサイズ、不要な発散を含め、性能不足に帰着する。レーザベースの光学系の実装の成功は、ビームエキスパンダコストとパフォーマンスの適切なバランスに依存する。それは、システム要件とビームエキスパンダの特性との相互作用の理解から始まる。

著者紹介

オリビア・フェールベルクは、米エドモンド・オプティクス社の製品サポートエンジニア。
e-mail: ofehlberg@edmundoptics.com
www.edmundoptics.com