技術論文

DfX の実践: 複雑な光学システムの組み立て、サービス、最適化のためのモジュラー戦略

ネイサン・ウォレス*
Optikos Corporation、107 Audubon Road、Bldg. 3、ウェイクフィールド、マサチューセッツ州01880

要約

Design for Excellence (DFX) は、複雑な光学システムの設計プロセス全体を通じて重要な決定を導く戦略的アプローチです。「X」は、製造、組み立て、コスト、またはパフォーマンス内のさまざまなプロセスを表すことができます。モジュール設計手法がアセンブリ、保守性、システム パフォーマンスをどのようにサポートしているかを調査し、実際の実装、設計のトレードオフ、システムの最適化について現実世界の洞察を提供します。開発の初期段階で DFX の原則とモジュール技術を適用すると、プロセスを合理化し、コストを削減し、全体的な製品品質を向上させることができます。

キーワード: DFX、モジュラー設計、アセンブリ、製造、パフォーマンス、開発

1. はじめに

光学システムの設計において、高性能、コスト削減、長期信頼性など、製品に求められるすべてのニーズを達成することは複雑な課題です。Design for Excellence(DFX)は、製造性、組み立て、コストなどの重要な考慮事項を設計プロセスに直接統合することで、この問題に対処する戦略的アプローチを提供します。DFXの「X」は、画一的な方法ではなく、特定の設計目標またはいくつかの目標の組み合わせに合わせて調整できます。DFXの例としては、スケーラブルな生産に向けてコンポーネントが最適化されるようにする製造設計(DFM)があります。Design for Assembly(DFA)により、複雑さと組み立て時間が短縮されます。予算の制約に合わせて設計上の決定を調整するDesign for Cost(DFC)、および長期的な保守性をサポートするDesign for Serviceability(DFS)。DFXを効果的に適用すると、最も重要な製品の成果を最大化しながら、開発作業をガイドできます。このペーパーでは、DFXが初期のシステムアーキテクチャ設計の選択に適用された光学システムの例を検討します。2つの異なる結果について説明します。1つはDFMの目的で、もう1つはDFAの目的です。

2. 光学システムの例

図1に示す典型的な蛍光検出システムを考えてみましょう。このシステムでは、高感度の蛍光イメージングを可能にするために2つの主要な光路が組み合わされています。照明経路は励起光をサンプル面に投影し、標本内の蛍光分子を励起します。次に、イメージングパスはサンプルから放出された蛍光を収集し、検出器上にマッピングします。[1]この高レベルのシステムアーキテクチャは、DFX原則を適用できる基盤を形成します。

*nwallace@optikos.com; 1 617 902-3158;optikos.com

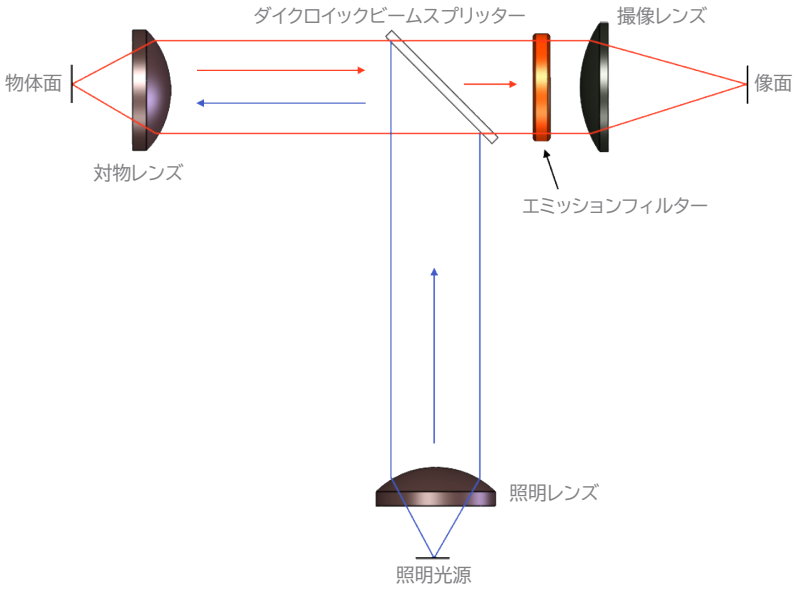

図1. 蛍光イメージングシステムの高レベルの光学アーキテクチャ。励起光(照明源)はダイクロイックビームスプリッターに向けられ、そこで対物レンズを通って物体面に送られます。放射光は対物レンズによって集光され、放射フィルターを通過し、結像レンズによって像面に結像されます。

蛍光検出プロセスは、励起光とサンプルの間の相互作用に依存しており、これにより長波長での発光が引き起こされます。この放射光は、二色性ビームスプリッターを使用して励起光から分離できます。さらに、関心のあるスペクトル領域をさらに絞り込むために、通常、発光フィルターが含まれています。このフィルターにより、必要な蛍光シグナルのみが検出器に到達するようになり、バックグラウンドノイズが最小限に抑えられ、信号対雑音比が向上します [2]。わかりやすくするために、システムは対物レンズと結像レンズを表す単一の要素で示されていますが、実際の蛍光結像システムは、はるかに複雑な光学アセンブリを使用する場合があります。対物レンズは複雑で高NAの対物レンズにすることができ、結像レンズは2つまたは3つの要素で構成して、検出器上に適切に補正された画像を生成することができます。これらの光学コンポーネントはそれぞれ、公差と位置合わせに注意して慎重に設計および統合する必要があります。 DFX手法は、最終的なシステムが実行するだけでなく、目的のDFXアプローチの主要な機能を確実に備えられるように、初期の設計選択を管理するのに役立ちます。

3. DFXの背後にある方法論

光学システムに適切なDFXパスを選択することは、開発プロセスの重要な初期ステップであり、システムまたは製品レベルの観点からアプローチする必要があります。光学システムは本質的に学際的なものです。適切に機能するために、光学要素に加えて、機械、電子機器、およびソフトウェアと組み合わせられることがよくあります。設計の1つの要素または領域を単独で最適化すると、別の場所でトレードオフや課題が発生する可能性があります。たとえば、公差を厳しくして光学性能を向上させると、製造の複雑さとコストが意図せず増加する可能性があります。したがって、DFXプロセスは、システムコンテキスト全体を理解することから始める必要があります。これには、エンドユーザーアプリケーション、運用環境、製品寿命、ビジネス上の制約など、多くの要件が含まれます。DFXプロセスは、主要な製品ニーズを収集して特定することから始まります。最初のステップは、製品またはシステムレベルのニーズを適切なDFX原則にマッピングすることです。設計のすべての側面を均等に最適化することはほとんど実現できないため、ランク順序付けのプロセスを使用してDFXパスに優先順位を付けます。表1は、開発チームが各設計ニーズを視覚的に確認し、どのDFX重点領域がシステムの成功に最も貢献しているかを評価できる、非常に簡略化されたマトリックスを示しています。これにより、リソースが最も大きな影響を与える場所に割り当てられるようになり、トレードオフを効果的に管理するのに役立ちます。たとえば、パフォーマンスと信頼性が重要であり、コストの優先順位が低い場合、開発チームは、より厳しい制御クリティカル許容値を達成するために、より高価なコンポーネントを許容する可能性があります。

顧客のニーズ	DFX の原則	設計実装例
高い光学性能	パフォーマンスのためのデザイン（DFP）	収差を最小限に抑え、高い解像度またはスループットを確保し、補償器を追加してパフォーマンスを回復します
製造コストが低い	製造容易性を考慮した設計（DFM）、コスト（DFC）	標準光学系を使用し、複数の領域で使用できるコンポーネントを設計し、公差を緩和し、部品数を削減します。
高い信頼性	信頼性を考慮した設計（DFR）	耐衝撃/耐振動、熱的に安定した設計
プロトタイピング	アセンブリ設計（DFA）、モジュール性	シンプルな組み立て、モジュラー設計
サービス/アップグレードの容易さ	保守性を考慮した設計（DFS）	頻繁なサービスを必要とするコンポーネント、高度にモジュール化されたコンポーネントへのアクセス

表1. 望ましい顧客ニーズ、マッピングされたDFX原則、および設計に影響する詳細の例を含むDFXマトリックス。顧客のニーズをランク付けして、最も重要な設計領域を決定できます。

最終的に、DFXパスの選択は、光学、機械、電気、製造チームからの部門横断的な意見を取り入れて、反復的かつ協力的に行う必要があります。システムレベルのアプローチを採用することで、光学設計が意図したとおりに機能するだけでなく、顧客やビジネスのニーズにも確実に適合するようになります。

4. シナリオ 1: 製造のための設計

製造のための設計（DFM）は、蛍光検出システムの開発において重要な考慮事項となる場合があります。このような光学システムを開発する際の幅広い要件を考慮すると、システムレベルのDFMアプローチは、パフォーマンス、コスト、製造可能性のバランスをとるために不可欠です。アライメント、公差管理、およびコンポーネントの統合は、設計プロセスの早い段階で取り組む必要があります。

蛍光システムの重要な要素の 1 つは光学的耐性の管理です。特に弱い蛍光信号を捕捉する場合、許容可能な性能を維持するには、対物レンズと結像レンズの両方を厳密に調整する必要がある場合があります。ただし、すべてのコンポーネントに超厳しい公差が必要なわけではありません。この場合にDFMを適用すると、潜在的な下流製造上の困難を排除するために光学アーキテクチャを再設計する必要が生じる可能性があります。光学設計がまだ完了しておらず、設計者が光学機械チームから意見を得ることができると仮定しましょう。数ミクロンの中心調整を維持することは、光学的な観点からはうまくいくかもしれませんが、機械チームにとっては十分な困難を引き起こすことに気づくかもしれません。部門を超えたチーム間で早期に協力することで、特定のチームや分野がこの困難に直面することを防ぐことができます。 これにより、光学品質を低下させることなく、コスト効率の高い生産が可能になります。図2に示す対物レンズのインターフェースを考えてみましょう。ここでのインターフェースは、市販の対物レンズに見られる典型的なネジ付きの種類ではありません。完成した対物レンズアセンブリの角度公差と心出し公差の両方を制御するために、パイロット付きフランジが組み込まれています。このアプローチにより、光学エンジニアと機械エンジニアは、中心が0.0005インチ[12.7um]未満、傾きが0.02度未満という構築時の不確実性を決定できます。これらの入力を光学公差モデルに適用すると、設計上の選択肢が得られ、堅牢なソリューションの作成に役立ちます。

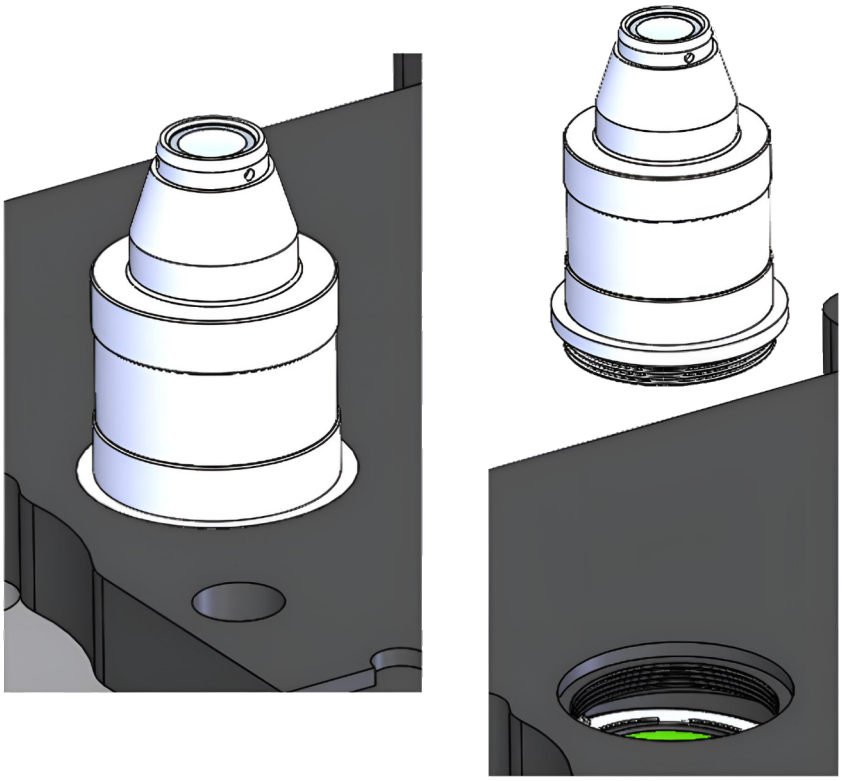

図2. 中心と角度を確立するために精密ボアと接続するパイロットフランジを備えた顕微鏡の対物レンズのインターフェース。[提供:Optikos]

ダイクロイックビームスプリッターには、独自の製造および組み立ての制約があります。その角度配置は重要な場合があり、取り付け構造は応力や位置ずれを引き起こすことなく正確な位置決めを可能にする必要があります。基準面や運動学的インターフェースなどの自動調整機構を設計すると、組み立て時間を短縮し、位置の不確実性を改善できます。図3は、基準面がフィルターを配置し、ツイストロックスタイルのリテーナーがフィルターを所定の位置に固定する放射フィルターマウントを示しています。排出フィルターを受け入れるハウジングは射出成形されており、低コストのソリューションに役立ちます。詳しく見てみると、DFMの他の重要な要素がいくつか示されています。リテーナーは平らなステンレス鋼製で、フォトエッチングプロセスによって製造されます。この部品には成形の必要がなく、大量生産の場合、標準のねじ付きリテーナーよりもコストが大幅に低くなります。取り付けられると、3つの内側のタブがフィルターリングに接触し、外側のタブがハウジングと接触します。内側タブと外側タブが回転方向にオフセットしているため、自然なたわみまたは波が形成され、バネ保持力が得られます。ここで使用されるフィルターは既製のものであるため、コーティングの開発時間の必要がなく、手頃な価格で入手できます。最後に、留め具は使用されておらず、組み立てプロセス中に専用ツールを使用してリテーナーを素早く挿入して所定の位置にロックします[3]。

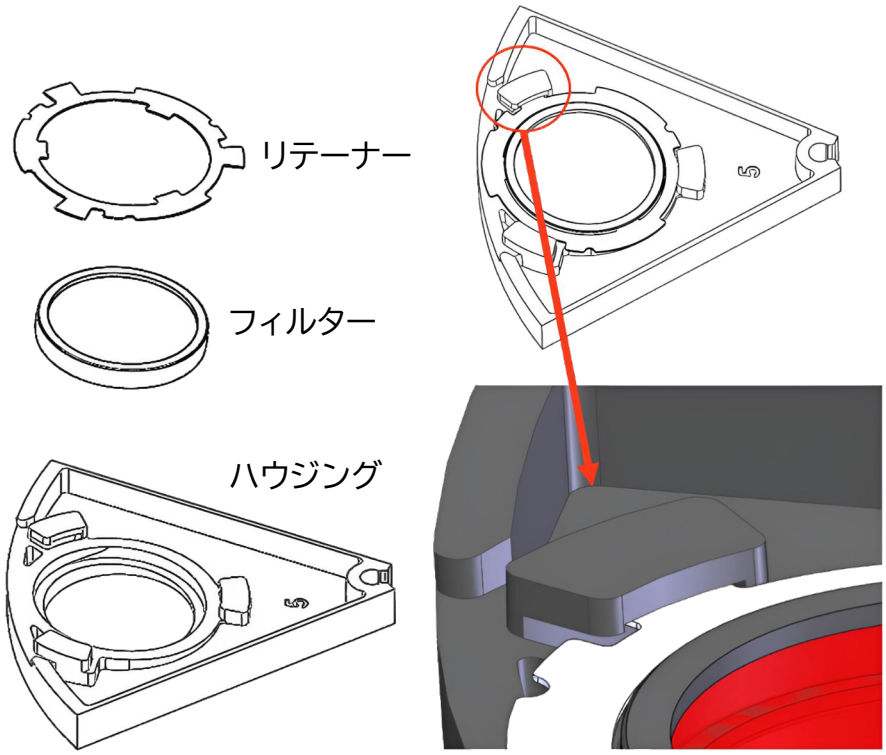

図3. 射出成形ハウジング、既製のリングマウントフィルター、フォトエッチング加工された平らなステンレス鋼製保持リングを備えたフィルター取り付け設計(左)。成形プラスチックハウジングの保持タブ保持機構の詳細図(右)。[提供:Optikos]

照明経路はアライメントの影響を受けにくいため、光学出力と熱負荷が低い場合、成形プラスチック光学系のメリットを享受できます。システム全体を通して、組み立てとアライメントを容易にし、調整可能な自由度を最小限に抑える設計を行うことで、必要な光学的完全性を維持しながら、システムを大規模に製造できるようになります。考慮すべき例として、照明経路のアライメントが挙げられます。光学系を解析する際には、照明経路内に許容誤差と管理を必要とする多くの要素が存在します。一般的なアプローチは、システムの組み立て時に個々のコンポーネントの位置合わせを行うことですが、これは有効です。しかし、DFMはいくつかの代替手段を提供します。各コンポーネントの位置合わせの代わりに、すべての位置合わせ許容誤差を1つのコンポーネントにまとめることが可能です。照明経路の場合、照明源をX軸とY軸に配置することで、出力光を空間的に制御できます。照明源をZ軸に移動させることで焦点を合わせることができます。この構成におけるDFMアプローチは、ダイクロイックビームコンバイナーとレンズから構築時の機械的許容誤差を確立し、光源をX、Y、Z方向に移動させることで性能回復を分析します。ここでのDFMの隠れた利点は、照明源が非常にアクセスしやすい場所に配置されているため、組み立て工程中に外部固定具を取り付けるのが容易なことです。図4は、照明源を移動させた場合の出力効果を示しています。光線は、見やすくするために大きく斜めに描かれています。

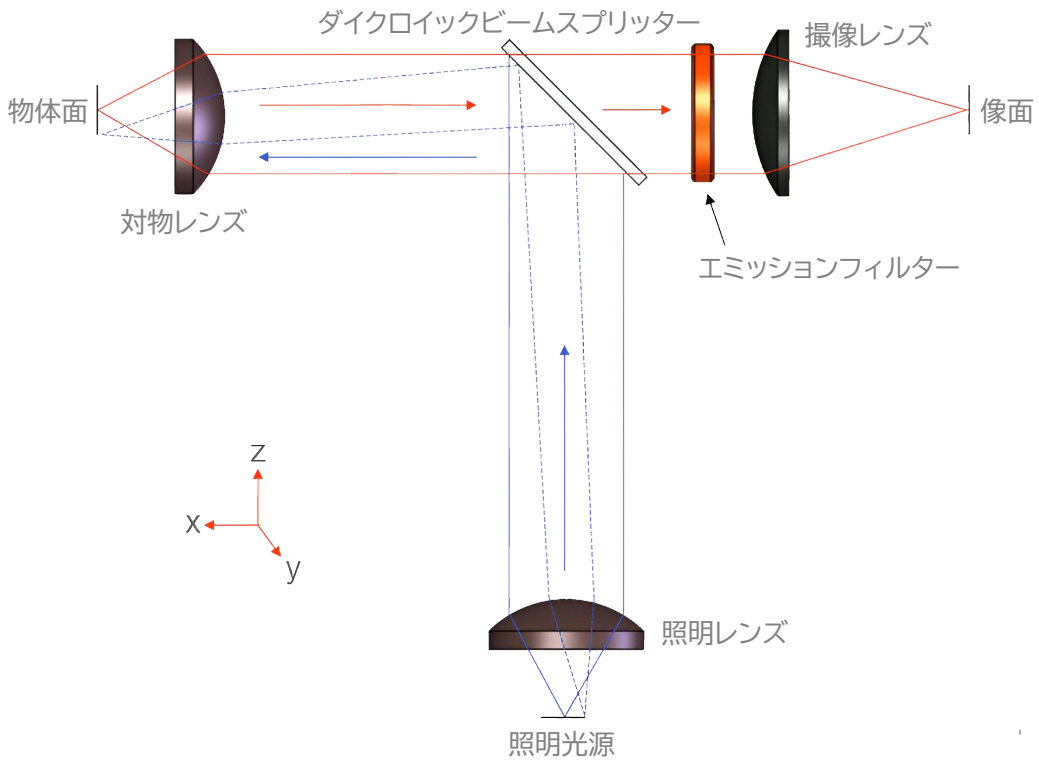

図4. 光源の変位と物体面の位置関係を示すために、平行移動した光線経路（かなり誇張して表示）。照明光源は、他のすべてのコンポーネントを固定しながら、アライメント要件を満たすように固定および操作できます。

5. シナリオ2：組立設計とモジュール設計

組立設計（DFA）とモジュール設計は、最終製品の構成がまだ不確定なプロトタイプ開発において重要な役割を果たします。蛍光ベースの光学システムは、モジュール式で組み立てが容易な部品を用いることで、試験と評価を簡素化できます。システムを個別の自己完結型モジュールに分割することで、開発チームはシステム全体を再構築することなく、個々のセクションを迅速に反復開発できます。これにより、開発期間の短縮と評価の柔軟性の向上が期待できます。[4]

この文脈におけるDFAの基本的な側面は、各モジュール内に自動調整機能と基準制御インターフェースを組み込むことです。ダイクロイックビームスプリッター、対物レンズ、結像レンズの正確な位置合わせは、性能を維持するために不可欠です。モジュールユニット内で精密機械加工された基準面またはキネマティックマウントを使用することで、大規模な調整なしにコンポーネントを正確に設置および交換できます。このモジュール戦略は、繰り返し可能な組み立てを容易にし、試作作業における重要な機能となり得ます。図5は、ダイクロイックビームスプリッターモジュールを示しています。ダイクロイックは、光学系の構造に挿入されるキャリアに取り付けられています。いくつかの重要な機能があります。まず、ダイクロイックビームスプリッターは基準面に対して位置合わせされており、基準面には、システム構造上のインターフェース機能に対して規定の公差があります。第二に、この構造には嵌合ピンが備わっており、ビームスプリッターの位置決めが正確に制御され、再現性も確保されます。試作段階で新しいダイクロイックミラーをテストする必要がある場合、モジュールを交換するだけで済み、それ以上の調整は不要です。

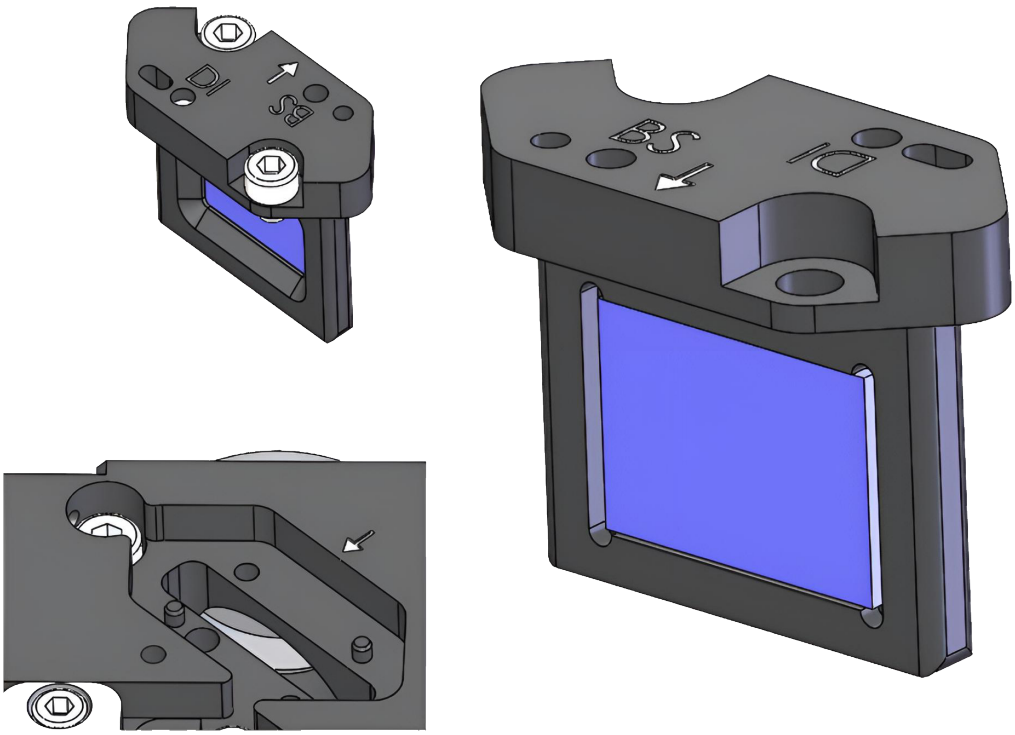

図5. モジュール式ダイクロイックビームスプリッターマウントの光学マウント基準とピン/スロットの機械的インターフェースを示す図。システム構造において、アライメントピンの隣にロックアウトピン機能が含まれていることに注目してください。[提供:Optikos]

さらに、物理的なレイアウトと組み立て手順は、主要な光学部品への容易なアクセスと迅速な交換を最優先に考慮する必要があります。試験およびビームアクセスのための設計上の配慮により、光路全体を分解することなくツールを挿入できます。特に試作において有用なもう1つの考慮事項は、将来的に部品を追加できるスペースまたは領域を設けることです。試作にはある程度の不確実性があるため、これらの追加機能を追加することで、再設計時間を短縮し、評価作業を迅速化できます。図6は、追加の照明チャンネルを追加した例です。これらの追加コンポーネントを受け入れるための機能を追加することで、基本レイアウトで光学系を構築し、後で追加コンポーネントを容易に追加できます。DFAをさらに進めた例を図7に示します。ここでは、同じカートリッジを2つ目の照明ビームコンバイナに使用し、複数のチャネルに実装しています。ラベルはどの光学系が取り付けられているかを識別するのに役立ち、前述のロックアウトピンはカートリッジを間違った位置に取り付ける可能性を排除します。

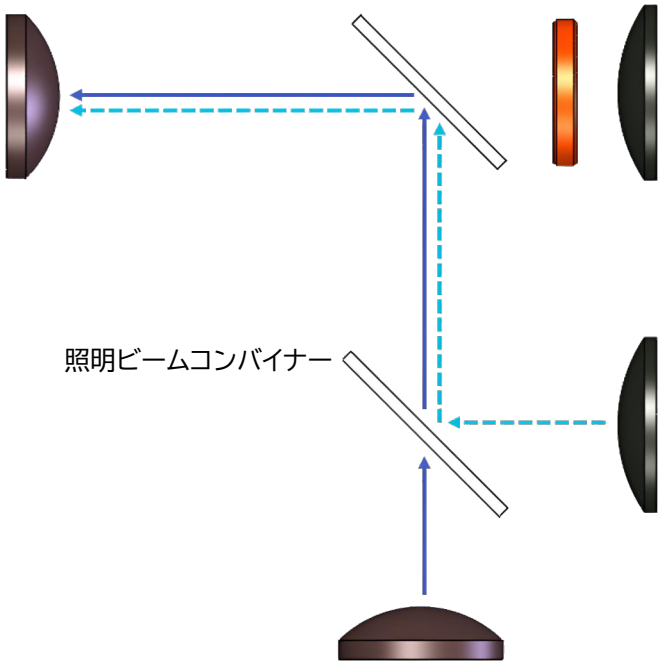

図6. 蛍光イメージングシステムに追加されたコンポーネント。2つ目の照明チャンネルと光路が破線矢印で示されています。

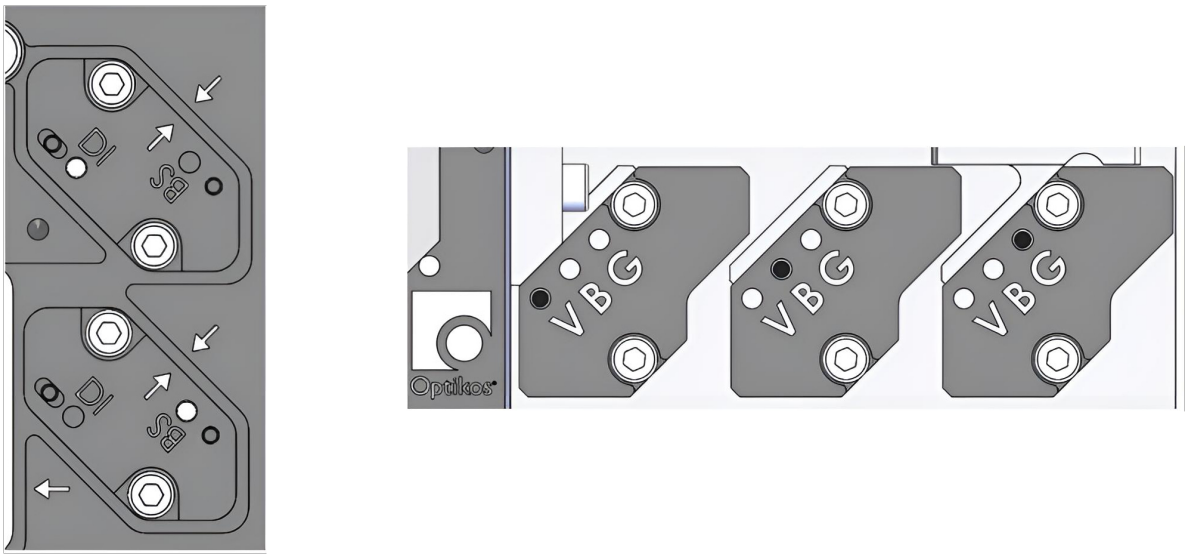

図7. モジュール式ビームコンバイナーマウントの2つの例を示します。ダイクロイックビームスプリッターと照明ビームコンバイナー(左)、および紫、青、緑の3つの波長に対応する3つの照明コンバイナー(右)。[提供:Optikos]

6. 2つのシナリオの比較

光学システムを設計する際に、DFXの原理を取り入れることで、顧客固有のニーズに合わせてシステムを最適化する包括的なアプローチが可能になります。ここで説明する各手法は、製品の開発と使用における異なる段階に対応していますが、これらを組み合わせることで、高性能であるだけでなく、拡張性と費用対効果の高いシステムの構築に貢献します。表2は、製造を考慮した設計（DFM）と組立・モジュール性を考慮した設計（DFM/DFM）の比較を示しています。

	DFM	DFA/モジュール化
主要目標	製造コストと複雑さの削減	組立工程の簡素化と効率化
主なメリット	生産コストの削減、歩留まりの向上	組立の高速化、エラーの低減、再現性の向上
対象エリア	部品製造	システム組立
デザイン重視	公差管理、標準化、材料選定	アライメント機能、部品削減、論理的なシーケンス

表2. 製造性を考慮した設計（DFM）と組立性を考慮した設計（DFA）の主な特徴と関連する設計側面の概要比較表。

DFMは、対物レンズ、結像レンズ、ダイクロイックビームコンバイナーといったシステムの光学部品と機械部品が効率的に製造され、信頼性の高い組み立てが行えることを保証します。これには、標準的で入手しやすい光学部品と材料の選択、許容誤差の過剰な仕様設定の回避、そして成形や標準的な機械加工といった一般的な製造プロセスに適合した部品の設計が含まれます。[5] DFAは、特にプロトタイプに適用される場合、組立時にこれらの部品を組み付ける方法を簡素化することに重点を置いています。DFAは、モジュール性や直感的な組立手順といった特徴を重視しています。DFMとDFAは、光学システムの開発においてそれぞれ独自の役割を果たしつつ、互いに補完し合います。

7. 結論

DFX原則の適用は、光学製品開発において重要です。製品要件のほぼすべての側面を考慮した包括的なシステムレベルのアプローチを促進するためです。光学設計では、非常に厳しい公差が求められることが多く、機械設計の実装段階で非常に困難になることがあります。製造性、組立性、保守性、その他の重要な要素に十分な注意を払わないと、最も革新的な光学設計であっても、製造中に大きな課題に直面したり、性能の期待を満たせなかったりする可能性があります。開発チームは、早い段階でDFXを組み込むことで、潜在的な問題を特定し、複雑さを軽減し、エンジニアリング領域内で最適化を行うことができます。これにより、コストのかかる手戻りを回避し、市場投入までの時間を短縮し、一貫した品質を確保できます。最終的に、DFX原則を採用することで、複雑な光学システムが、顧客に永続的な価値を提供する堅牢で商業的に実現可能なソリューションへと変化します。

参考文献

[1] Martin-Palma, R.J., Field Guide to Optical Sensing, SPIE Field Guides, Volume FG48
[2] Tkaczyk, T.S., Field Guide to Microscopy, SPIE Field Guides, Volume FG13
[3] Yoder, P.R., Opto-Mechanical Systems Design, Volume 1, CRC Press（第4版）
[4] Erixon, G.（1996）. Design for Modularity. In: Huang, G.Q.（eds）Design for X. Springer, Dordrecht
[5] Boothroyd, G., Dewhurst, P.（1990）. Product Design for Assembly, Boothroyd Dewhurst, Inc.（第1版）