

# マルチバンドコートフィルタが 科学応用の性能基準の見直しを迫る

アランナ・ヨハンセン、ランス・フォーテンベリー、ピーター・エガートン、マイク・スコベイ、アンバー・チャイコフスキー

薄膜技術の進歩により新しいタイプのマルチバンドコーティングが可能になった。これにより、メーカーは競争力のある価格で改良された性能を提供できるようになっている。さらに、性能基準を見直し、様々な領域でイノベーションを促進するマルチバンドフィルタが可能になる。

マルチバンドフィルタは、固有の光学的諸問題を解決する様々なタイプに分類できる。個々のタイプには、それぞれ独自の連続の製造課題がある。これが、実際に達成できるものの制約となっており、また薄膜製造工程の信頼性に影響を与えている。マルチバンドフィルタの科学的、産業的アプリケーションを理解することで様々なフィルタタイプや製造可能性がさらによく理解できる。

## マルチバンドフィルタ アプリケーション

全てのマルチバンドフィルタの共通点は、多波長ではあるが明確に区別できる波長域、一般にはUVから中赤外(MWIR)、すなわち280nm~5 $\mu$ m程度の波長域を、その間の帯域を阻止しながら、透過する能力である<sup>(1)</sup>。この楕状のスペクトル構造を示すマルチバンドフィルタは、様々な屈折率の材料層を基板に交互に堆積することによってできるハードコート、誘電体薄膜光学フィルタのサブセットである。

マルチバンド光学フィルタは、ライフサイエンスのアプリケーションにとって重要である。蛍光顕微鏡では、単一サンプルでマルチ蛍光タグを同時検出するためにマルチバンドパス励起とエミッションフィルタが、多色ビームスプリッタとともに使用される。この分

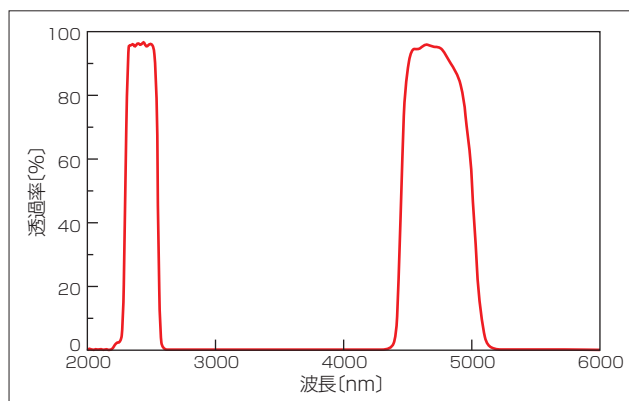


図1 気象変化モニタに使用されるデュアルバンドIRフィルタは、ウォータバンドにおける吸収が無視できる程度であり、低バスバンドリップルである。

野では、新しいタイプの切り替え可能単色LEDやレーザー光源など、継続的な進歩がハイパフォーマンスマルチバンドフィルタの需要を後押ししてきた。こうしたマルチバンドフィルタは、極めて透過率が高く(93~98%)、ディープブロッキング(光密度>OD5.5計測、設計では>OD8)であり、バンド間の遷移は急峻(<1%に迫るほぼ垂直のスロープ)である。

レーザー蛍光とラマン分光アプリケーションにおけるさらなる進歩がハイパフォーマンスマルチノッチフィルタ需要の原動力になっている。こうしたフィルタは、マルチレーザーラインを同時阻止しながら高帯域透過を維持する。蛍光体にエネルギーを与えて励起状態にするのに必要とされるレーザー光の量は、帰還ラマン信号レベルよりもはるかに大きい、これは励起波長の4乗に

逆比例する。場合によっては、このことの意味は、励起強度よりも $10^{12}$ 小さな蛍光マーカを検出するということである。これは、レーザー波長の減衰の深さ(>OD6)によって達成される。ノッチエッジが十分に急峻でない場合、励起モードと放出モード間の波長の近さのためにレーザー波長に近い信号は失われる。

ハイパフォーマンスマルチバンド薄膜におけるこのような躍進から恩恵を受ける他の分野は多く、これにはリモートセンシング、レーザーブロッキング、半導体製造、産業用モニタなどが含まれる。例えば、ローパスバンドリップルであり、デュアルバンドからウォータバンド(2.7 $\mu$ m)における原則ゼロ吸収のIRフィルタは、気候の変化をモニタすることができる(図1)。こうしたフィルタの製造には、非常に安定したコーテ

リングプロセスが必要になる、ほとんどの従来プロセスは堆積中に微量の水を含んでいたり、多孔性のためにコーティング後に水を吸収する傾向があるからである。

パスバンドが10以上のフィルタから、特殊スペクトル形状に適合するように設計された精密薄膜コーティング、マルチパスバンドにわたり群遅延分散をコントロールするように設計されたフィルタまで、新しい技術が「マルチバンド」という用語を再定義しようとしている。

マルチバンドパフォーマンスは、バンドの数、スループット、ブロッキングレベル、スペクトルエッジの急峻さに関して継続的に改善されている。いろいろな意味で、マルチバンド光学フィルタは今では、古典的なシングルバンドデバイスと競争している。同じフラットトッププロファイル、連続的なデレーブODブロッキングで肩を並べているので、設計者は、光学システムをよりコンパクトに、効率的にできるようになっている。

マルチバンドフィルタの設計と製造は、シングルバンドの場合を考えても簡単なことではなく、建設的干渉／相殺的干渉原理の高度な理解、材料堆積をモニタし制御する精緻なプロセスを必要としている。米アラクサ社(Alluxa)では、マルチバンドフィルタを広く5つに分類している。①広帯域、②狭帯域、③エッジダイクロイック、④ノッチ、⑤任意のスペクトル形状を持つフィルタである。バンドの数が増えることで、各フィルタクラスに特有な複雑さが加わり、製造プロセスにおける変動主要因を考慮する必要が出てくる。

## マルチ広帯域フィルタ

20～50nmの相対的に広いバンド幅

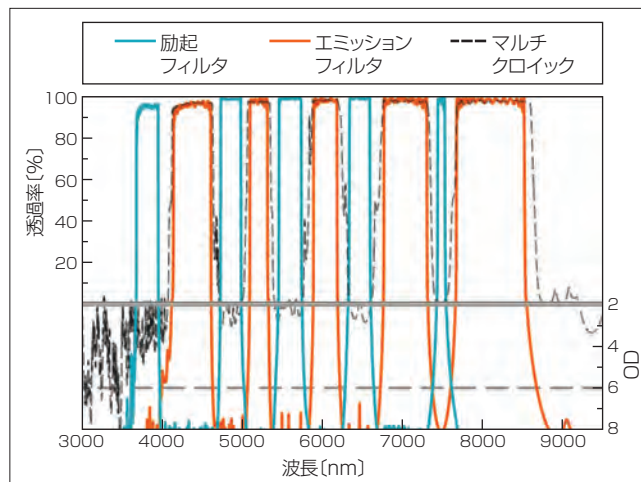


図2 フルマルチバンド蛍光フィルタセットを示している。ハイパフォーマンス5バンド励起(EX)、エミッション(EM)、およびマルチクロイックフィルタで構成。

をもつマルチバンドフィルタが、ライフサイエンスアプリケーションで普及しており、そのような例の1つとして、バイオイメージングシステムがある。このようなシステムでは、励起と放出のためにマルチ照射帯域が必要になる。

透過はパスバンドで90～95%の平均値となり、一方平均ブロッキングレベルはバンド間でOD5～OD6である。一般的に、マルチバンドフィルタでは、パスバンドと阻止バンド間の遷移は波長の2～3%であるが、もっと狭いスペクトル遷移も可能である。

励起チャンネル(EX)とエミッションチャンネル(EM)は、干渉原理に由来する薄膜堆積法により相互に分離して製造されるが、連係動作するように仕様化されている。マルチバンドEXフィルタとEMフィルタは、透過チャンネルと阻止チャンネルの戦略的な配置を必要とする。これは製造中に維持される必要がある。すなわちエッジ位置の制御と精度が、システムの各バンドおよび各フィルタにとって重要である。エッジの位置は、高OD阻止から高パーセンテージT(カットオン)への midpoint 遷移を規定、あるいは逆に、高い透過からデレーブOD(カットオフ)への遷移を規定しており、これによって各チャンネル

の境界が確定される(図2)。

EX/EMバンドのオーバーラップ、あるいはバンド間の不十分な阻止によってシステムにおける不要なクロストークが生ずる、これは設計段階で考慮し対処する必要がある。バンド間のODレベル全体が >OD6となるのが望ましいことを確認すべきである。ただし、>OD5も場合によっては許容される。

カットオン／オフポイントの厳格な制御は、精密なモニタリング法によって達成される。ここでは誘電材料の個々の層が高(H)屈折率層と低(L)屈折率層を交互に堆積する際に、個々の層が計測されリアルタイムで調整される。最新のモニタリング技術で層の誤差をその場で修正することができる。これは、HL材料不整合の影響、波長に対する透過レベルの望ましくない変動であるリップルなど、一般的な製造誤差の除去にも役立つ。

4バンド以上のハードコートの広帯域フィルタは単一ガラス基板に堆積されるので、波長位置に関してシャープで明確に定義されたエッジを維持するために、バンド数が増えるにともない精密制御された安定した製造プロセスが極めて重要になる。1回の稼働内における速度変動によって起こる均一性

の問題がバンドの不都合な変化の原因となり得る。結果的に、EXチャンネルとEMチャンネル間のスペクトルオーバーラップが、最終的な蛍光画像におけるコントラスト低減となる。

## マルチ狭帯域フィルタ

狭帯域フィルタは、10nm以下の幅で波長帯域を透過する連続した複数バンドのフィルタをマルチ狭帯域フィルタと言い、機能はマルチ広帯域フィルタと同じだが、作製にはさらなる課題があることが多い。

狭帯域設計は、スタックしたファブリペロ共振器に依存している。共振器は誘電体共振器を持ち、これは多数の1/2波長キャビティで相隔てられた1/4波長厚層のリフレクタで構成されている<sup>(2)</sup>。マルチキャビティを利用してスペクトル波形を「直角」にしているのも、その結果、透過光が円めの度合いが強いシングルキャビティ設計と比べると、フラットトップになっている。

シングルバンド、マルチキャビティのフィルタ作製は、ほとんどのコーティング蒸着装置にとって容易ではない。スペクトルモニタリングとして知られている、変化点の変動をコンピュータ制御することが、個々の層の蒸着厚の正確な制御に最も効果的である<sup>(3)</sup>。コーティング工程中、フィルタは絶えず計測され、多数の層に関わる膜厚誤差を考慮に入れながら、膜厚変動が補正される。このアプローチは、常に理論に一致する低リップルの狭帯域フィルタの再現性を著しく容易にする。

マルチ狭帯域フィルタにより光学設計者は、任意の方法でスペクトルを分解することができ、今日のハイパワー光源と組み合わせた広範な潜在的アプリケーションに道を開くことができる。例えば、アラクサ社は10チャンネルフィル

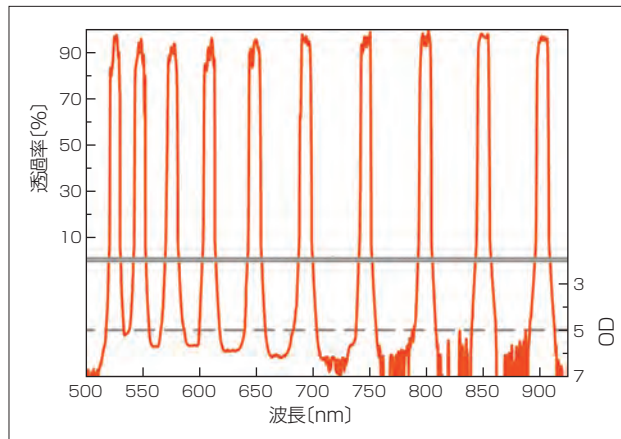


図3 マルチデザインアプローチを利用して、10-バンドのマルチ狭帯域フィルタを作製。

タを製造しているが、これは楯状の可視光波長を生成し、特徴はフラットトップ、高透過性、バンド間の阻止率>OD5である(図3)。白色光をフィルタ透過させた後、個々のバンドの出力先変更は容易であり、独立に分析される。

## マルチエッジ「マルチクロイック」フィルタ

マルチクロイックは、通常ビームスプリッタと言われており、これは特に、EX/EMシステムのマルチ広帯域フィルタとともに普及している。マルチクロイックは、入力スペクトルを2つのビームに分ける。1つは反射、もう1つは透過である。一般に45°で使われるが、他の角度も可能である。フィルタは双方向であり、必要に応じてスペクトルを統合、分離の両方で使われる。

マルチクロイックは通常シングルサイドフィルタであり、他の面はゴースト・イメージングを避けるために反射防止膜となっている。反射から透過(その逆)への急峻な遷移が、蛍光およびマルチスペクトル生体イメージングを含め、多くのアプリケーションで画像コントラストの強化となる。こうしたシステムへの実装では、ダイクロイックフィルタは、角度ズレが少なく、偏向分離が小さくなければならない。そ

れに、イメージング品質にマイナスの影響を与える目立った焦点ズレを完全に除去するために、反射と透過波面の両方で優れたフラットネスが実現されていないとしない。

特定のケースでは、こうしたフィルタは明確に異なるパスバンドで、(透過振幅よりはむしろ)位相や群遅延分散の制御を必要とする。1つの特殊例は、4色ビームスプリッタである。これは、6個の励起レーザ全ての位相を制御して、3D構造化照明を有する顕微鏡(3D-SIM)に統合する。励起光が操作されてマルチ3D-SIMに入ると、最終的な合成画像が得られる。振幅と位相の両方の制御は、設計中に細心の注意を払う必要があるが、理論に極めて忠実にコーティングを作製できる蒸着も必要になる。

広帯域フィルタと同じように、50%のカットオン/オフ位置が重要である。設計層は1/4波長厚でないことがあるので、蒸着技術は層誤差を最小にしなければならない。非正規の入射角で機能するように設計されたフィルタでは、特に連続した遷移エッジが2つ以上では、計測プロセスと評価が重要である。基板の厚さと偏向分離は、フィルタのスペクトル特性の評価に影響を与えるビーム偏向や50%エッジなど、計測限界となり得る。

## マルチノッチフィルタ

マルチバンドフィルタの逆のスペクトルプロファイルを持っているので、マルチノッチフィルタは関心のある個別の波長帯域を(透過ではなく)阻止または反射する。フィルタ形状と設計構造がわずかに違うが、一般的にこれらのフィルタの目的はインバンドブロッキングを強め、帯域外の光の透過を最大化することにある。

20年以上前に導入された、マルチノッチフィルタは主にレーザから人を保護するマシンビジョンアプリケーション用に設計された。そのような目的では今でも利用されているが、新しいアプリケーションが豊富になってパフォーマンスは著しく向上した。例えば、3Dシネマは簡単なノッチフィルタを使用して可視スペクトルを、2つの重ならない、オフセットスペクトルコムに分け、1つをそれぞれの目に割り当てる。一方、ラマンシステムは、超狭帯域のノッチフィルタを必要とする、これはレーザ刺激光を阻止しラマンシグナルに焦点を合わせるためである。外科医は狭帯域の色補正ノッチフィルタを必要とする、これは手術中に動作中のレーザからの反射を阻止するためである。同時に、フィルタを通して中立的なカラー外観を維持する。色補正の特徴は、一般にスペクトル部分ノッチあるいは完全ノッチフィルタで構成されている。目的は、透過でフィルタのCIE白色点をバランスさせるためである。

マルチノッチフィルタの設計は、ODレベルが増し、帯域幅が狭くなるにしたがい難しくなっている、層数と複雑さが、ODレベルとほぼ線形的に、また帯域幅とは逆比例的に増加するからである。マルチ狭帯域フィルタ構造と同様に、マルチノッチの設計は高い層精度と制御を必要とする。これは帯域

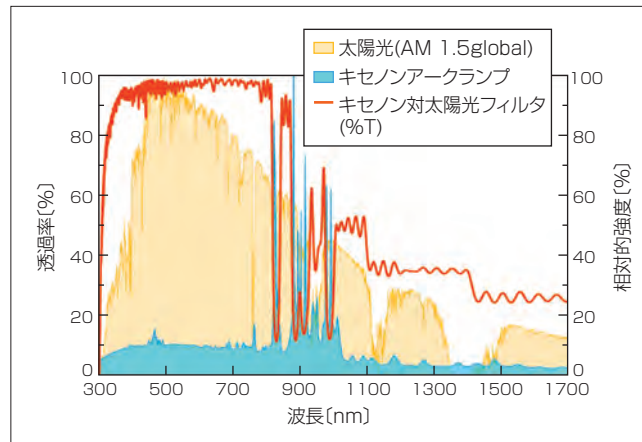


図4 任意のスペクトル形状を持つマルチバンドフィルタの例は、太陽のスペクトルに合わせてキセノンアークランプのスペクトルを成形するように設計されている。

外透過をフラットにし、阻止プロファイルを急峻にするためである。

可能なら、設計者は設計協調(例えば、266nm/532nm/1064nmトリプルノッチ)を利用して製造中のランダムエラーを最小化する、こうした協調により自然な阻止域となる。例えば、1064nmノッチは、532nmバンドを阻止するようにも比較的簡単に修正される、反復薄膜スタック内のHとL材料の比率を再設定するだけでよいからである。こうして、1つの設計から2つのノッチが生まれるので、独立に2つのノッチを作る必要はなく、その上、同じ設計内で機能するように調整されることになる。

## 任意の形状のマルチバンド

任意のマルチバンドは、前述のフィルタクラスの典型的な形状または構造に適合しない。むしろ、これらのフィルタは、入力光を操作して所定の変動のあるマルチバンドへ入れるために

「ターゲット」プロファイルを使ってもよい。そうすると、極めて特殊な反応曲線ができる。例えば、ソーラフィルタは標準的な光源の出力スペクトルを太陽光のスペクトルに一致するように成形する(図4)。

見ればわかるように、こうした設計は設計段階で膨大なコンピューティングパワーを必要とする。製造中、このような設計は、目標とする透過の大きさや位置に影響するランダムな蒸着誤差の影響を受ける。一般に、製造されたフィルタは理論値に対して±5%かそれ以上優れたレベルのスペクトル形状目標を達成しているが、それは曲線の正確なプロファイルと特徴に依存する。

最先端のパフォーマンスレベルを持つマルチバンドフィルタは、光学的に可能な限界を継続的に押し上げる。需要が伸び続けているので、薄膜フィルタメーカーは、こうしたフィルタを競争力のある価格で製造する革新的な方法を設計し続けることになる。

### 参考文献

- (1) See <http://bit.ly/1qgrS3H>.
- (2) See <http://bit.ly/1rIeGpK>.
- (3) H. A. Macleod and D. Richmond, *Optica Acta*, 21, 6, 429-443 (May 1974).

### 著者紹介

アランナ・ヨハンセンは米アラクサ社のアプリケーションスペシャリスト、ランス・フォーテンペリーは同社技術ダイレクター、ピーター・エガートンは事業開発副社長、マイク・スコベイは同社CEO、アンバー・チャイコフスキーは製品ラインマネージャー。  
e-mail: amber.czajkowski@alluxa.com URL: www.alluxa.com