

極薄で高性能な ポリマー干渉フィルタ製造の パラダイムを変更する

サラ・ロックナー、フーマン・バナエイ

この重要な光学システム部品を製造するための新しい手法により、製造時間は数日から数時間に短縮し、設計の柔軟性は高まる。

光学システムの最も一般的な部品の1つが、光学フィルタである。光学フィルタは、特定の波長を検体または検出器へと透過させて、その他の波長を吸収または反射する。波長選択のための新しい手法（ホログラフィックメタマテリアルや体積ブラッググレーティング [Volume Bragg Grating: VBG] など）がこの15年間で登場しているが、定評あるフィルタメーカーの大半が、積層型の干渉フィルタを従来の方法で製造している。

干渉フィルタはどれも、屈折率の高い材料と低い材料の層を交互に重ねた構造を持つ。それらの層の相対的な厚さによって、フィルタの分光性能が決まる。従来のフィルタメーカーは、真空コーティングチャンバを使用して、各層を一度に1つずつ作成する。米エ

ベリックス・オプティカル・フィルターズ社 (Everix Optical Filters) は、ポリマー熱延伸処理を使用してすべての層を同時に作成することにより、このパラダイムを変更している (図1)。

干渉フィルタにおいて、各層の界面は光の一部を透過し、一部を反射する。その結果として生じる、波長固有の建設的干渉と破壊的干渉により、特定のスペクトル帯がフィルタを通過するか、それともフィルタによって反射されるかが調整される⁽¹⁾。ほとんどの干渉フィルタは、光を吸収しない材料で設計されており、光は反射するか透過するかはのいずれかとなる。

メーカー各社は数十年間にわたり、真空プロセスを使用して干渉フィルタを作成してきた。しかし、エベリックス社は今回、高性能のプラスチック干

渉フィルタを製造するための拡張性に優れた完璧な手法を完成させた。ファイバ延伸に似た技法が用いられている (図2)。最初に、複数の層を正しい比率で積層することによって、大きなポリマープリフォームを形成する。次に、このプリフォームを加熱して一方向に引き延ばす (熱延伸) ことにより、スペクトルのマッピングが行われ、検査され、フィルタの形状に切断された薄膜を作成する^{(2)~(5)}。加熱プロファイル、速度、ウェブテンションなど、多数の変数がこのプロセス全体を通して制御される。この分野で30件を超える特許を保有するエベリックス社は、すべてのパラメータを延伸時に同時に監視および制御するために、2015年から絶えずこのプロセスの改良を重ねてきた。

これよりも性能は低いが大判のプラスチックフィルタを製造するためのプロセスも登場しているが、そのほとんどが、大面積の窓用フィルムやディスプレイの市場を対象としている。米3M社や東レのフィルムに代表されるこれらのポリマーシートは、同時押出によって作成されており⁽⁶⁾、視覚的に美しい反射面や干渉赤外線 (IR) カットなどの基本機能を持たせるために、干渉の物理現象を利用する。しかし、これらのフィルタは、主に美観目的で使用されるか、あるいは、他の高性能フィルタと併用されるため、そのスペクトル要件は、上記の熱延伸フィルタよりもはるかに緩い。

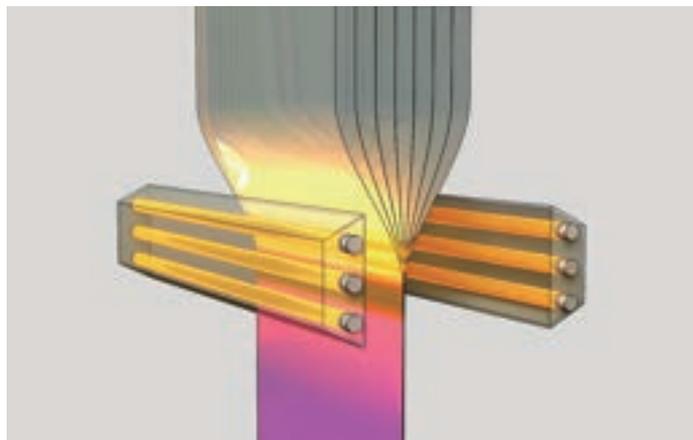


図1 モノリシックなポリマースタックを、加熱ゾーンを通して一方向に引き延ばすことにより、フィルタを形成する (本稿の画像はすべて、エベリックス・オプティカル・フィルターズ社提供)

真空ベースの手法との比較

60年以上前に確立された、元来の真空ベースのフィルタ製造プロセスでは、熱蒸着したフィルム(エポキシとカバースリップによって保護されている場合が多い)が使用されるが、この15~20年間のより現代的な手法では、イオンアシストとスパッタを使用して、硬い酸化フィルムがガラス基板の表面に生成される。初期の積層フィルタは、所望のスペクトルを達成するために、ガラス、コーティング、エポキシの複数の層で構成されていて、厚さは数mmにも上ることが多かった。表面コーティングのフィルタは、それよりもはるかに薄い(通常は1~2mm)、傷がつきやすく、欠け、破損、表面汚染が生じやすい。これとは対照的に、エベリックス社のフィルタは、やや柔軟性が高く、欠けや破損が生じにくい、極薄のポリマー層から形成されて、その中に埋め込まれている。また、干渉層はそれよりも厚いアクリルカバーの間に埋め込まれるため、カバーに小さな傷がついても、全体的な性能に影響は生じない。フィルタ全体の厚さは、一般的に0.05~0.5mmである。

真空蒸着のフィルタも延伸ポリマーのフィルタも、同じ原理(数百もの層の間の干渉)に基づいて機能するため、どちらの方法でも優れた性能を達成することができる(表参照)。ただし、新しい熱延伸手法には、以下に示す複数のメリットがある。

速度。 上述のとおり、真空蒸着法は、特に複雑なデザインを生成する場合は、フィルタの完成までに数日を要する可能性がある。特にスパッタ法は、非常に時間がかかる。これに対して新しい手法は、ポリマープリフォームをモノリス(モノリシック構造)として形成し、フィルタを1工程で作成するた

め、プリフォームからフィルタを作成する処理は、数時間以内に完了する。

拡張性。 真空チャンバのサイズは一般的に約1m²で、それによって、真空蒸着プロセスで作成できるフィルタの数量が制限される。エベリックス社のプロセスでは、プリフォームのサイズによってロットサイズが決まるので、拡張は容易である。

柔軟性。 新しい手法では、未加工フィルタの延伸に加えて、インラインのスペクトル測定やレーザ切断など、その他のインライン処理手法を活用することができる。エベリックス社は、CNCレーザ切断を使用しており、1秒未満で顧客が望むほぼ任意の形状に切断することができる。レーザ切断機は、フィルタエッジの封止も行うため、経時とともに層が剥がれてくることはない。エベリックス社は、エッジ効果を最小化して封止エッジを生成するために、何年もの月日をかけて、同社フィルタのレーザ切断プロセスを完璧な状態に仕上げた。

これに対して、真空コーティングされたプレートは、スペクトル測定の前にチャンバから取り出す必要がある。また、機械切断(ダイシング)やコアドリルといった標準的なガラス切断方法が一般的に使用されるため、カスタム



図2 エベリックス社のドロータワー(延伸タワー)は、光ファイバ製造施設で使われているものに似ている

形状を良好な歩留まりで達成するのは、新しい手法よりも困難である。特にコアドリルは、エッジのチッピングを低減するためにガラスフィルタを犠牲層で被覆してから、ホールソー(穴のこぎり)で切断し、被覆を除去し、クリーニングするという、非常に時間のかかる処理になる。

フォームファクタ。 熱延伸フィルタには基板がないため、厚さは一般的なガラス製の干渉フィルタの1/2から

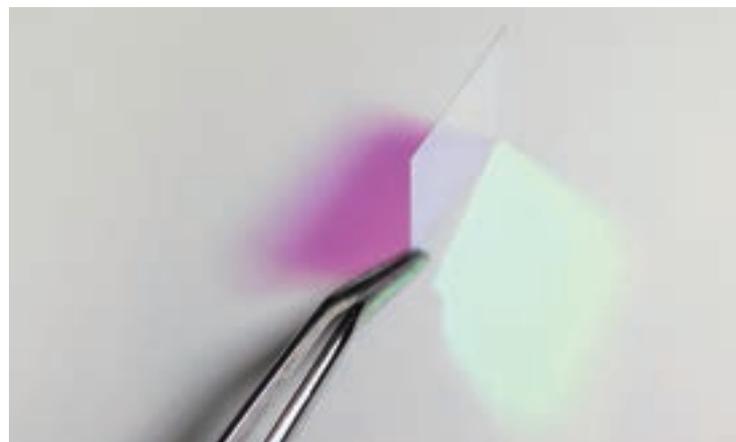


図3 エベリックス社のフィルタは、極薄で基板を持たない

真空コーティング法と熱延伸法の比較

機能	エベリックス社の熱延伸法	真空コーティング法
拡張性	高い—プリフォームのサイズによってバッチサイズが決まる	中程度—真空チャンバの容量が限られている
消費電力	低い—加熱ゾーンは小さく、処理時間は数時間	高い—スパッタリングチャンバを数日間稼働するため、最大で70倍の電力が必要
スペクトルのカスタマイズ性	高い—広帯域から狭帯域までの設計に対応	非常に高い—広帯域から、非常に急峻なエッジを持つ極狭帯域までの設計に対応
層の均一性	高い—材料は摩擦レスの粘性流体	高い—大きなチャンバとカスタムマスクが必要で、基板の回転が適用される
量産時の単位原価	低い—自動化が可能	高い—自動化は実行不可能
カスタム形状	可—CNCレーザ切断	歩留まりは低く、能力は限定される
最小厚さ	0.05 mm	0.5 mm
AOIを補償するように作成可能	可	不可
耐久性	封止エッジ	エッジが欠けやすい
柔軟性	フレキシブルまたはリジッド	リジッドのみ
重量	軽い—軽量ポリマー製	重い—オールガラス製—厚さが同じ場合で質量は約2倍
動作/保管温度	-40° -90° C*	-50° -200° C
*現行製品の場合。より高い温度に対応する製品を開発中である		

1/10になる(図3)。薄いことと、光学グレードの亚克力(ガラスよりもはるかに軽量な材料)で主にできていることから、軽量でもある。また、他の部品に裏面粘着で貼り付けたり、エポキシ樹脂で接着したりすることによって、独自の光学設計の可能性を追求することもできる。最後に、干渉フィルタに、入射角度(Angle Of Incidence: AOI)に応じたブルーシフト(吸収帯が短波長側にずれる現象)が生じることは、よく知られている。エベリックス社のフィルタは熱可塑性プラスチックでできているため、3D形成することによって、スペクトルに対するAOIの影響を低減または除去することができる。

吸光フィルタとの比較

最も古い光学フィルタリング方法は、吸光フィルタで、科学者やエンジニアによって使用される前に何千年もの間、教会の窓や装飾美術に使われる

「ステンドグラス」を作成するために使用されていた。真空チャンバや干渉フィルタが登場する前は、この方法が波長選択のための唯一の手段だった。吸光フィルタは、著しいAOI効果を示さず、長い波長範囲の遮断に有効に使用できるが、その使用は、マトリックス内の発色団の溶解度と、適切な発色団の有無によって制限される。

多くの干渉フィルタメーカーが、有色の吸光フィルタガラスを干渉スタックと併用して、長い波長範囲の遮断を行う。干渉層を有色ガラスの上に直接蒸着するか、フィルタ基板を有色ガラスの上にエポキシ樹脂で接着することによって、必要な遮断が行われる。これとは対照的に、エベリックス社とそのカスタム材料供給業者は、色素をドープしたカスタムプラスチックを作成して、ポリマーフィルタ設計に直接採用している。これらのハイブリッド型フィルタは、吸収と干渉の両方を単一

のユニットに統合している(7)。このポリマー吸光フィルタはカプセル化されているため、多くの有色ガラスに一般的に見られる表面の曇りなどの劣化が生じない。

エベリックス社は、民生市場(AR/VR、健康監視用ウェアラブルデバイスなど)、小型POC(Point Of Care)診断装置(内視鏡や携帯型PCR装置など)、IoTや、その他の低コストで軽量なセンサ(使い捨て型食品センサやドローン搭載センサなど)を含む、幅広い用途を対象とした、高性能な光学フィルタを製造しており、高性能、軽量、薄型、低コストのフィルタをこれらの市場に提供している。

参考文献

- (1) H. A. Macleod, Thin-Film Optical Filters, Fourth ed., Boca Raton, FL: CRC Press (2010).
- (2) E. Banaei, "Method of thermally drawings structured sheets," U.S. Patent 10,287,203 B2(May 14, 2019).
- (3) E. Banaei, "Method of thermally drawing structured sheets," Europe Patent EP2 958 865 B1, (Apr. 28, 2021).
- (4) E. Banaei, "Method of thermally drawing structured sheets," U.S. Patent 9,994,476 B2 (Jun. 12, 2018).
- (5) E. Banaei, "Method of thermally drawing structured sheets," U.S. Patent 9,597,829 B2 (Mar. 21, 2017).
- (6) Y. N. F. C. N. Furuno, "Apparatus and method for manufacturing laminated sheet," U.S. Patent US 2008/0277059 A1 (2008).
- (7) E. Banaei, J. Boga, and C. Bisson, "Flexible, ultra-thin, hybrid absorptive-reflective thin-film filters and methods of making the same," U.S. Patent 11,435,508 B2 (Sep. 6, 2022).

著者紹介

サラ・ロックナー博士(Sarah Locknar, Ph.D.)は、米エベリックス・オプティカル・フィルターズ社(Everix Optical Filters)のシニアアプリケーションサイエンティスト、フーマン・バナエイ(Hooman Banaei)は、同社最高経営責任者兼最高技術責任者(CEO/CTO)。e-mail: sarah.locknar@everix.co と hooman@everix.co; www.everix.co