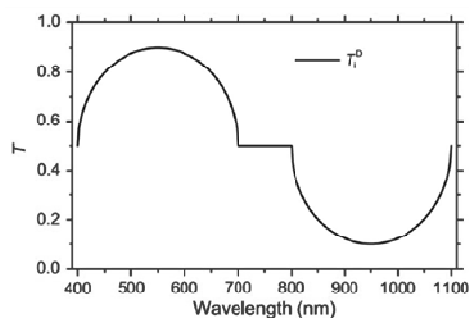


## 光学多層膜フィルタ製造技術の向上

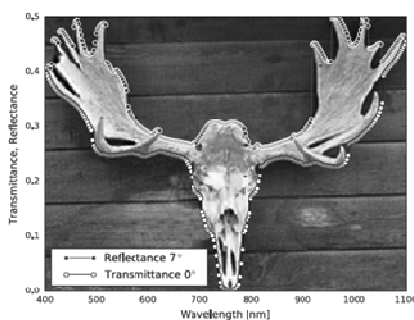
株式会社ニコン 生産本部 加工技術開発部 部長  
秋山貴之 AKIYAMA, Takayuki  
(当協会 光学薄膜技術講座 講師)

光学薄膜は、光学系の透過率向上やゴースト低減に寄与する反射防止膜が良く知られているが、所望の波長帯の光を透過・反射させる、偏光成分で分割する、特定波長帯のみを切り出すなど、光を制御する様々な目的の光学多層膜フィルタもあり、重要な役割を担っている。本稿では光学多層膜フィルタ製造技術の向上を、3年毎に北米で開催される Optical Society of America 主催 Optical Interference Coatings (OIC) 学会の製造コンテストの内容を参照しながら紹介する。

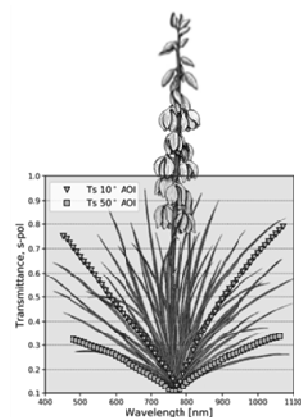
第14回 OIC2019 は参加者数が347人、18セッション、約200件の報告が行われた。この学会の特徴の一つと言ってよいと思うが、開催に先立って主催者側から問題が出され、参加者で回答を競う設計・製造・測定の各コンテストが開かれる。その中の製造コンテストの目的は、「その時点で最先端の光学薄膜製造能力を試すこと」とされている。チームと呼ばれる参加者は、お題として出された目標特性を持つように製造したサンプルを主催者側へ提出する。膜物質を選択し、膜設計を行い、成膜条件を調整してサンプルを製造する一連の作業が必要で、光学薄膜製造技術の総合力が試される。主催者側は2つの研究機関の NIST : National Institute of Standards and Technology, USA と ODA : Optical Data Associates, USA にサンプルの測定を依頼、これらの機関で測定した特性と目標特性の乖離をメリット関数値で表し、それらの平均値の小さい順にランク付けする。



OIC2013: 可視近赤外域(400~1100nm)の特殊形状透過フィルタ



OIC2016: ムース(ヘラジカ)ヘッドのシルエットを透過特性(0°)と反射特性(7°)で模したフィルタ



OIC2019: 植物ユッカの葉のシルエットを入射角10°と50°のs偏光透過特性で模したフィルタ

図1 OIC2013, OIC2016 と OIC2019 の製造コンテスト問題

図1に過去3回の製造問題を示す<sup>1-3)</sup>。いずれの問題も設計解は、すべての層厚が異なる複雑な膜構成の多層膜フィルタとなる。表1に記載されている OIC2013 問題の各チーム設計解は層数: 22~608

層，総膜厚：2～23 ミクロンの範囲であった。OIC2016 では吸収層を含む設計解，OIC2019 では層数：74～255 層，総膜厚：8～18 ミクロンで基板の両面に成膜する設計解が多かった。製造コンテストの結果と解説は学会にて報告があり，ランク 1 とされたチーム名のみが公表される。その他のランクのチーム名の公表はないが，自チームの位置付けは確認できる。OIC2010 までは日本からの参加はなかったが，OIC2013 と OIC2016 では日本からのチームがランク 1 を獲得している。図 2 に OIC2013 でランク 1 とされた 3 社のフィルタの測定特性，目標特性との乖離，および膜構成を示す。

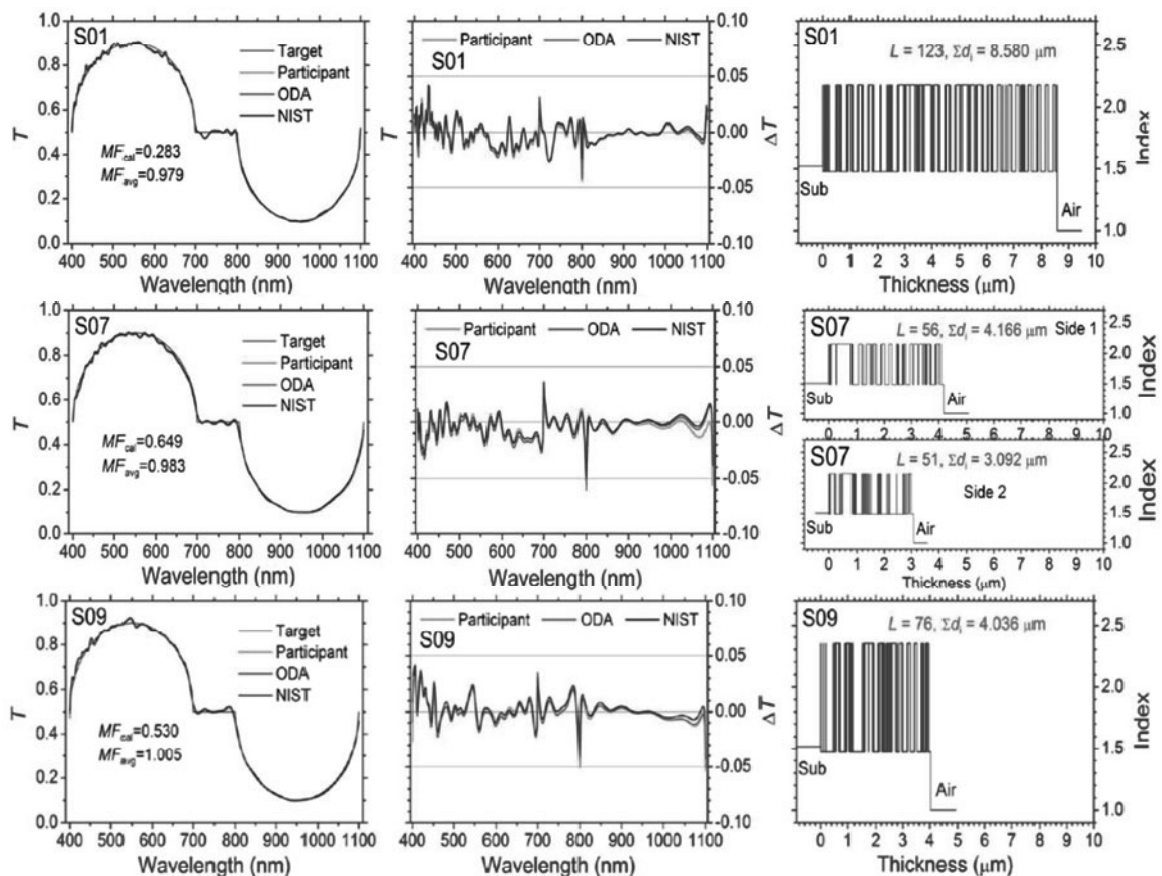


図 2 OIC2013 のランク 1 フィルタ (S01 : JDSU, S07 : ATF, S09 : Nikon)

製造コンテストの結果から，膜設計・成膜・モニタリングなどの技術の向上が見えてくる。

#### ・膜設計技術の向上：

膜設計は，設計者が基本膜構成を光学薄膜設計ソフトウェアに入力して，層厚のみをパラメータとして最適化を行い，目標特性を持つ膜構成を得る手法が一般的である。しかしながら，製造コンテストの問題のような目標特性の場合には，基本膜構成の設定に苦労することがある。各チームはそれぞれ工夫していると思うが，この課題に対しては，ソフトウェアが自動的に層を追加する機能を持つ合成法の一つのニードル法を用いることができる。ニードル法は開発後ほどなく市販ソフトウェアに搭載され，従来手法では設計が困難と考えられていた解を見出すことが可能になっている。以前は合成法のソフトウェアは研究者が独自でプログラミングをした成果を論文などで見る程度であったが，市販されたことで多くの設計者が使用してその実効性が広く確認されている。

ニードル法は，非常に薄い層（ニードル層）を 1 層ないしは複数層，あるルールに従って自動で多層膜中に追加した後に，ニードル層を含めた多層膜全体の層厚を最適化するという一連の手順を繰り返して特性改善を行う手法である。多層膜中のどの部分にニードル層を追加するのかを見出す手順は，概略次の通りである。多層膜の出射媒質（基板）側から入射媒質（空気）側まで非常に細かい間隔で

ニードル層を順次追加していったときのメリット値を評価して、メリット値の変化量のふるまいを追加位置の関数として把握する。特性改善はメリット値を小さくすることなので、この関数の値がマイナスになる追加位置を探せばよい。マイナス位置が複数ある場合は一番マイナス値が大きい箇所にニードル層を追加する、複数の位置でマイナス値が十分に大きい場合は複数の場所に複数のニードル層を追加する、などは設計者があらかじめ設定しておく。光学薄膜の設計において、高低2つの屈折率を持つ膜物質から対称3層等価膜を構成して、中間屈折率を持つ層を表現できることが知られている。ニードル法はこれを効率的に行っていると思われる。実際に得られた設計解は層厚の薄い層が多用され、層数は多くなる傾向がある。

・成膜技術とモニタリング技術の向上：

複雑な膜構成の多層膜フィルタの製造条件は、使用する装置の成膜方法やモニタリング方法に合わせて決められる。製造コンテストで開示された各チームの成膜方法やモニタリング方法などの情報は表1に記載がある。成膜方法はスパッタリング法が多用されていることが分かる。真空蒸着法はプラズマアシストの併用となっている。膜密度が高く屈折率が安定で、かつ、成膜速度安定性が高い成膜法が選択されている。成膜速度の安定性では、長時間成膜における装置全体の熱的変動が小さいことも重要である。成膜装置は加熱機構を備えているものが多い。品質のみならず成膜速度を上げて生産性と両立するとなれば、装置の熱的変動の大小が成膜速度安定性に影響する。この観点からすれば、発生熱量の少ない成膜法を用いた装置が有利となる。今後の装置開発のポイントかもしれない。

膜厚制御方法については広波長帯域光学モニタリング使用の記載がある。成膜中の単一波長モニタリングと広波長帯域モニタリングのそれぞれの特徴などは OIC2004 以降で毎回セッションが開かれて取り扱われている。成膜中に得られたモニタリングデータに基づいた膜厚決定や成膜条件への自動フィードバック機能などの高精度化や高機能化がフィルタ特性向上に寄与している。突き詰めていくと、成膜中あるいは成膜後の測定における、波長、透過率や反射率などの値の正確性がフィルタ性能を決めている。

表1 OIC2013 コンテスト応募サンプル：フィルタ設計，メリット値，成膜方法など

Sample No.	Filter Design			MF by Participants		Measured MF by Two Labs			Rank	Additional Information Provided by Participants
	No. of Sides Coated	L	$\Sigma d$ ( $\mu\text{m}$ )	Theory	Measured	NIST	ODA	Average		
S01	1	123	8.580	0.283	0.987	0.992	0.966	0.979	1	Magnetron sputtering Plasma-assisted deposition with rate 0.2 nm/s; all layers terminated using a wideband optical monitor
S02	1	22	1.859	1.960	2.314	2.234	2.342	2.288	9	
S03	1	100	8.693	0.360	11.687	14.483	14.941	14.712	13	Magnetron sputtering platform Coating materials SiO <sub>2</sub> , Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub> High-index material Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub> Ion-assisted reactive sputtering; total deposition time 5.7 hrs; wideband optical monitoring
S04	1	116	6.366	0.700	2.278	2.095	1.939	2.017	7	
S05	1	22	2.154	1.500	18.482	18.257	18.015	18.136	14	
S06	1	142	7.932	0.401	1.031	0.984	1.121	1.052	2	
S07	2	56 + 51	7.259	0.649	0.966	1.052	0.913	0.983	1	
S08	1	30	2.208		2.772	3.041	3.094	3.067	11	
S09	1	76	4.036	0.530	0.959	1.001	1.010	1.005	1	
S10	1	83	5.243	0.380	2.027	1.543	1.592	1.568	4	
S11	1	55	4.169	0.492	1.600	1.520	1.591	1.555	4	
S12	1	136	9.222	0.359	2.561	2.453	2.547	2.500	10	
S13	2	554 + 54	23.099	0.337	2.813	2.465	1.649	2.057	8	
S14	1	38	2.500	0.420	1.850	1.953	1.813	1.883	6	
S15	2	24 + 4	2.733	1.160	1.674	1.727	1.949	1.838	5	
S16	1	36	2.585	0.816	3.240	3.334	3.113	3.224	12	
S17	1	76	4.036	0.530	1.062	1.095	1.120	1.107	3	

層数が200層レベルの複雑な膜構成の光学多層膜フィルタは実用化の域に達していると言ってよい。

振り返ってみると、ドライビングフォースは光通信用フィルタやプロジェクタ向けフィルタのニーズであったと思う。その当時、多くの企業や研究機関の開発成果が OIC2001 と OIC2004 で報告された。これらの成果をベースに、製造技術が更に精練されて現在に至っている。昨今では、光学特性に加えて、低膜応力、低欠陥、高レーザー耐性、環境耐性や膜均一性などの観点でも更なる品質向上が求められる。必要な性能はどれが欠けてもアプリケーション展開に至らないので、仕様達成は技術課題となる。OIC でもこれらの各性能項目に着目したセッションが設けられている。また、光学多層膜とメタ材料やメタサーフェイスと呼ばれる微細構造と組み合わせる新たな光制御機能を探る動きもある。今後のトレンドであろう。

さて、新聞にも掲載されたのでご存知の方が多いと思うが、オリオン座のベテルギウスという赤色超巨星が通常の変光範囲を超えて暗くなっており、もしかすると近いうちに超新星爆発をするかもしれないとのこと。宇宙のイベントは超ロングスケールの時間軸なので、生きている間には起こらない可能性が圧倒的に高いようだが、我々を含む地球上の生物や生活に与える影響はないのであれば、是非この壮大な宇宙ショーを見てみたいものである。

OIC2016 と OIC2019 では、超高感度の重力波アンテナ向け多層膜ミラーのセッションが設けられた。Ti ドープ Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 層と SiO<sub>2</sub> 層からなる多層膜ミラーの実力値@1064nm は、吸収：0.5ppm、散乱：10ppm、透過率：3ppm で推定反射率が 99.998%以上と報告された。イオンビームスパッタリング法で成膜され、光学有効内で高い均一性や低欠陥の成膜が実現されている。一方で、重力波アンテナの検出限界を決める要素の一つである多層膜ミラーの熱雑音低減のために、さらに有利となる膜物質の調査とそれらの成膜条件や成膜後アニール条件などを探る開発が進行中で、将来、新たな膜構成の多層膜ミラーに変更される可能性もある。光学特性のみならず必要な性能項目の仕様達成のため、ここでも製造技術の向上が進められている。

#### 参考文献

- 1) L. Li, et al. “Broadband transmission filters from the 2013 Optical Interference Coatings manufacturing problem contest,” Appl. Opt. 53, A248- A258 (2014).
- 2) D. Poitras, et al. “Manufacturing problem contest,” Appl. Opt. 56, C1- C10 (2017).
- 3) D. Poitras, et al. 2019 Topical Meeting on Optical Interference Coatings: Manufacturing Problem Contest,” Appl. Opt. 59, A31- A39 (2020).