膜応力による基板の反りの定量的計算について

杉浦 宗男^a, 田村 耕一^a, 小檜山 光信^b

^a東海光学(株)(〒444-2106 愛知県岡崎市真福寺町越田 121)

^b(株)テックウェーブ(〒179-0074 東京都練馬区春日町 6-8-40)

Development of a Procedure for Precisely Calculating Substrate Bending Caused by Multilayer Coating Stress

Muneo SUGIURA^a, Koichi TAMURA^a and Mitsunobu KOBIYAMA^b

^aTokai Optical Co., Ltd. (121 Koeda, Shinpukujicho, Okazaki-city, Aichi 444-2106)

^bTecwave Co., Ltd. (6-8-40 Kasugacho, Nerima-ku, Tokyo 179-0074)

Keywords : Optical Coating, Thin Film Stress

1. はじめに

光学薄膜は、幅広い分野で光学製品の性能向上や、新たな付加価値を付けるものとして普及している。身近なものでは、眼鏡レンズの表面に施された反射防止膜がある。スマートフォンやタブレットなどモバイル端末が普及した今日では、LEDの強い青色光のカット機能を併せもつコートも市場に多く出ている¹⁾。光学的な性能追求だけでなく、眼の健康という付加価値に目を向けた薄膜開発の一例である。また、自動車業界では100年に一度と言われる変革期を迎え、自動運転の技術開発が進んでいる²⁾。障害物の検知に光を用いたセンシング技術LiDAR (Light Detection and Ranging)が導入し始められているが、このセンサーでも光学薄膜を使った干渉フィルターがS/N比の向上に活躍している。その他工業製品や学術用途でも、光の波長を切り分けるフィルター、光量を調整するフィルター、偏光や位相を制御するフィルター・ミラーなどが幅広く使われている³⁾。光を使ったアプリケーションの拡大、そして高性能化が求められる中、数百層にも達する多層膜フィルターが求められることもある。光学性能を求めて積層数を増せば、薄膜の応力も増加し、基板の変形や、長期の耐久性など、光学特性以外の課題も顕在化しやすくなる^{4)~8)}。製品へ組み込まれた状態で、本来の機能を発揮するものを製造するために、薄膜の機械的な性質について改めて注意を払う必要がある。

薄膜が持つ応力については、100年以上前から今日まで長く研究の対象になっている。19世紀後半には、電着膜を厚くつけると膜が自発的に剥がれてしまうことや、薄膜の応力で電極のプレートが反る現象が知られていた。1909年にG. G. Stoneyにより反りと薄膜応力との関係式が提案され、半定量的な議論が行われるようになった。Stoneyはその式を用いて、薄いスチールのプレートに析出したニッケル薄膜の応力を算出している⁹⁾。この式は後に少し修正が加えられ、光

学薄膜の分野ではStoneyの式、もしくはStoney-Hoffmanの式として使われている^{9)~13)}： $\sigma = E_s b^2 / 6 (1 - \nu_s) r d$ 。 σ と d はそれぞれ薄膜の内部応力と膜厚、 E_s 、 ν_s 、 b 、 r はそれぞれ基板のヤング率、ポアソン比、板厚、曲率半径である。真空蒸着法では、薄膜と基板の密着を強くし、耐久性を増すために、基板を加熱して成膜するのが一般的である。応力を解析する上で、熱の影響も重要な要素である^{14)~16)}。

生産現場でも膜応力は重要なテーマになっている。光学薄膜フィルターやミラーを製造する際には、薄膜設計の段階で、成膜後にどの程度の反りが生じるか事前に知る必要がある。もし設計したフィルターの反りが仕様より大きいことが分かれば、別の薄膜設計の解を探すことや、基板の再選定などの対策が取れる。その計算には、多くの場合、上述のStoneyの式が用いられるが、実際のところ精度良く反りを予測するのは容易ではない。入力値の精度はその一因と考えられる。同じ材料を成膜しても、例えば、導入するガス量、成膜の速度、基板の加熱温度、イオンプロセスではその条件、などが変われば薄膜物性は異なる。各社で成膜条件は少しずつ異なるので、文献値を用いてもうまくいかないことが多い。自社でデータをとる場合でも、その算出に必要なパラメーターが多いので誤差が増える。非効率ではあるがトライ・アンド・エラーで製造せざるを得ないこともある。

本稿では、生産効率向上を目的とした、成膜後の反りを定量的に予測する計算の枠組みを提案し、イオンアシスト蒸着とイオンビームスパッタリングへ適用した例を紹介する。

2. 成膜により生じる基板の反り

よく研磨された光学基板でも、表面にはサブミクロン以下の起伏もしくは反りがある。その最も高い箇所と低い箇所の差(PV値)は面精度と呼ばれ、研磨精度の指標になっている。面精度の測定にはレーザー干渉計が用いられることが多い。He-Neレーザーの波長632.8 nmを使用するので、この波長

図1 イオンビームスパッタリングで Ta₂O₅/SiO₂ 多層膜 (32 層, 総膜厚 5.8 μm) を成膜したときの干渉縞¹⁷⁾
 (a) は成膜前, (b), (c), (d) はそれぞれ板厚が 8 mm, 5 mm, 3 mm の合成石英基板へ成膜した後のもの

を単位にとって表記するのが一般的である。例えば, PV 値が 63.28 nm であれば, $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ なので, その面精度は 0.1λ もしくは $\lambda/10$ と表記する。符号は凸面をマイナス, 凹面をプラスに取ることが多い。本稿もこれに従う。

面精度のよいフィルターやミラーを製造するために, 精度よく研磨された基板を用意しても, 成膜するとその表面は変化するので注意が必要である。本章では, 面精度 $\lambda/10$ 以下に研磨された基板が, 膜応力でどのように反るか紹介する。

図1は外径 30 mm の合成石英基板に, イオンビームスパッタリングで 32 層, 総膜厚 5.8 μm の Ta₂O₅/SiO₂ 多層膜を成膜したときの干渉縞である。(a) は成膜前, (b), (c), (d) はそれぞれ板厚が 8 mm, 5 mm, 3 mm の基板へ成膜した後の干渉縞である¹⁷⁾。膜応力は基板を球面状に変化させるので, どの干渉縞も同心円状になっている。(c) を例にとると, 縞が約 2 本あるので反りが λ 程度であることが見て取れる。(b) → (c) → (d) の順に縞の数が増えているのは, 基板の板厚が薄いからである。Stoney の式によれば, 反りは板厚の 2 乗に反比例する。レーザー干渉計の解析ソフトを使って求めた面精度は (b) - 0.37 λ (c) - 0.98 λ (d) - 2.58 λ であり, この 3 点でフィッティングをすると, 反り $\propto (\text{板厚})^{-1.98}$ になった。膜応力による反りに対して, 板厚の影響が大きいことが確認できる。解析の結果から, 表面はすべて凸であるので, この薄膜の内部応力が圧縮であることも分かる。ここでは, 板厚と反りの傾向を示したが, 板厚を固定して薄膜の積層数を増やせば, 反り量は比例して増加する。

次に同一バッチで, 異なる硝材へ成膜したときの例を紹介する。図2は外径 30 mm, 板厚 3 mm の基板へ, イオンアシスト蒸着で 58 層, 総膜厚 9.2 μm の Nb₂O₅/SiO₂ 多層膜を成膜したときの干渉縞である。(a) は合成石英, (b) は BK7 で

図2 イオンアシスト蒸着で Nb₂O₅/SiO₂ 多層膜 (58 層, 総膜厚 9.2 μm) を成膜したときの干渉縞
 (a) 合成石英, (b) BK7 基板へ成膜した後のもの, 基板の外径は 30 mm

ある。基板を約 150 °C に加熱して成膜を行った。同じ膜を成膜しても, 硝材が異なると縞の数が異なることが分かる。レーザー干渉計で測定した面精度は, (a) - 1.50 λ , (b) - 2.46 λ である。成膜前の面精度は, 合成石英は -0.09 λ , BK7 は -0.11 λ であり共に $\lambda/10$ 程度であったので, 両者の違いは成膜で生じている。線膨張係数, ヤング率, ポアソン比といった熱・機械的な物理量が異なることが原因と推測される。次章では, どちらの基板を使っても, 同じ計算の枠組みで, 成膜後の反りを予測する方法を紹介する。

3. 成膜後の反り予測

この章では成膜後に基板がどれだけ反るかを, あらかじめ定量的に予測できるようにした計算の枠組みを紹介する。

3. 1 で計算模型を導入し, 3. 2 でイオンビームスパッタリングとイオンアシスト蒸着へ適用した例を紹介する。

3. 1 計算模型

平行平面基板へ成膜すると, 基板表面は球面状に変化する。本稿では円形状の基板を取り扱い, その反り δ を図3のように円弧の高さとして定義する。すなわち, 基板の半径を l , 曲率半径を r とすれば, $\delta = l^2/(2r)$ である。ただし, 基板の外径に対して十分小さな反りを取り扱うので $(l/r)^4$ 以上の高次項は無視した。Stoney の式を曲率半径 r について解き, この式へ代入した次式を用いて計算を行う。

$$\delta_c = \frac{3(1-\nu_s)l^2\sigma d}{E_s b^2} + \delta_0 \dots\dots\dots (1)$$

δ_0 は成膜前の基板の反りである。内部応力 σ は, 以下に示す (2) 式のように薄膜の真応力と熱応力に分けて計算を行う。熱応力は薄膜と基板の線膨張係数の差に比例するので, 同じ膜を成膜しても基板の種類が異なれば値が変わる。一方, 真応力は薄膜材料だけで決まる量とする。すなわち, 2 つの起

図3 基板の反りの概念図

源の応力の和である内部応力 σ は、薄膜と基板の組み合わせで決まる量であることに注意する。本研究では、硝材によらず同じ枠組みで、見通しよく反りを計算できるよう次式を用いた。

$$\sigma = \sigma_i + (\alpha_s - \alpha_f) \left(\frac{E_f}{1 - \nu_f} \right) (T - \tau_{\text{fit}} T_d) \cdots \cdots \cdots (2)$$

このモデルは単層膜についてのものであるが、反射防止やフィルターの機能を得るには多層膜にする必要がある。屈折率が異なる2種類の薄膜を交互に積層するのが一般的であるので、ここでは真応力 σ_i を、多層膜の近似的な平均真応力として次のように表す^{18),19)}。

$$\sigma_i = a_{\text{fit}} \sigma_H \tilde{d}_H + b_{\text{fit}} \sigma_L \tilde{d}_L \cdots \cdots \cdots (3)$$

$a_{\text{fit}} \sigma_H$ と $b_{\text{fit}} \sigma_L$ はそれぞれ高屈折率薄膜材料と低屈折率薄膜材料の真応力である。 $\tilde{d}_{H(L)} = d_{H(L)} / d$ であり、 d は多層膜の総膜厚、 $d_{H(L)}$ は高屈折率薄膜材料(低屈折率薄膜材料)の総膜厚である。応力の符号はプラスが引張り応力、マイナスが圧縮応力とする。 $\tau_{\text{fit}} T_d$ は成膜時の温度、 T は測定室の温度である。 a_{fit} 、 b_{fit} 、 τ_{fit} は無次元量であり、はじめは1にとることにする。 E_f 、 ν_f 、 α_f はそれぞれ多層膜のヤング率、ポアソン比、線膨張係数である。(3)式と同様に、高屈折率薄膜材料と低屈折率薄膜材料の値を使って次のように表す： $E_f = E_H \tilde{d}_H + E_L \tilde{d}_L$ 、 $\nu_f = \nu_H \tilde{d}_H + \nu_L \tilde{d}_L$ 、 $\alpha_f = \alpha_H \tilde{d}_H + \alpha_L \tilde{d}_L$ 。また、 α_s は基板の線膨張係数である。

このように反りを計算する式には多くのパラメーターが含まれている。薄膜の熱・機械物性値を評価した研究があるが、それらの値はバラつきが大きい^{15),16)}。精度よく求めることが難しいので、本研究では、薄膜のヤング率、ポアソン比、線膨張係数についてはÇetinörgü, *et al.*¹⁶⁾のデータを用いることにした。これらの値は、我々の薄膜と差異があると考えられる。同じく熱応力の項に含まれる T_d には基板加熱の設定温度を入力するが、実際の基板上での温度と差異が生じる

ことも考えられる。このようなことから、(2)、(3)式に導入した a_{fit} 、 b_{fit} 、 τ_{fit} をフィッティングパラメーターとして取扱い、あらかじめ用意した成膜サンプルの反りの測定値 δ_m と、計算値 δ_c が合うようにこれらの量を決定した²⁰⁾。具体的には、下記の量が最小になるように決定している。

$$f = \left[\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \{ \delta_{c,j}(a_{\text{fit}}, b_{\text{fit}}, \tau_{\text{fit}}) - \delta_{m,j} \}^2 \right]^{1/2} \cdots \cdots \cdots (4)$$

N はフィッティングのために用意したサンプルの数である。

3. 2 適用例

本節では、前節で導入した計算模型を用いて、成膜後の反り予測を行った例を紹介する。フィッティングは15個のサンプルを用意して行った。基板は合成石英とBK7を用いた。両者は線膨張係数の違いが比較的大きいため、熱応力の解が適切に得られやすいと想定したからである。基板のヤング率、ポアソン比、線膨張係数は次の値を用いた。合成石英は $E_s = 72.0$ GPa、 $\nu_s = 0.170$ 、 $\alpha_s = 5.9 \times 10^{-7}$ 、BK7は $E_s = 78.6$ GPa、 $\nu_s = 0.213$ 、 $\alpha_s = 9.4 \times 10^{-6}$ である。基板はすべて平行平板の円形状で、典型的なサイズは、外径が1インチから2インチ程度、厚みが3 mmから12 mmである。膜厚は400 nmから12 μm 程度であり、詳細は表1、表2にまとめた。成膜前後の基板の反りはレーザー干渉計(Verifire-XPZ, ZYGO)を用いて測定した。光の波長は632.8 nm、測定室の温度は20℃程度である。外径に対して中心90%を有効領域とし、そのPV値を記録した。反りの計算値と測定値は、波長632.8 nmを単位として表記する($\lambda/632.8$ nm)。

以下、3. 2. 1項ではイオンビームスパッタリングの例、3. 2. 2項ではイオンアシスト蒸着の例を紹介する。いずれも薄膜材料は $\text{Ta}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2$ である。

3. 2. 1 イオンビームスパッタリング薄膜

イオンビームスパッタリングで成膜したときの反り予測をするために、表1に示したサンプルを用いてフィッティング

表1 フィッティングパラメーターの決定に用いたサンプル一覧
(イオンビームスパッタリングで作製)

No.	硝材	基板			層数	コート			成膜後面精度 (Wave)
		外径 (mm)	厚み (mm)	面精度 (Wave)		膜厚(μm)			
						合計	H	L	
		2 <i>l</i>	<i>b</i>	δ ₀		<i>d</i>	<i>d</i> _H	<i>d</i> _L	δ _m
1	石英	30.0	3.09	− 0.210	1	0.400	0.400	0.000	− 0.316
2	石英	30.0	3.09	0.097	1	0.406	0.000	0.406	− 0.205
3	石英	30.0	3.09	− 0.130	27	2.803	0.994	1.809	− 1.453
4	石英	30.0	5.03	0.095	28	4.478	1.785	2.693	− 0.651
5	石英	30.0	5.03	0.021	28	4.478	1.785	2.693	− 0.749
6	石英	50.8	12.04	− 0.051	29	4.742	1.672	3.070	− 0.456
7	石英	30.0	3.09	− 0.191	49	4.887	1.835	3.052	− 2.360
8	石英	30.0	3.08	0.049	49	4.887	1.835	3.052	− 2.171
9	石英	30.0	3.09	0.098	36	6.343	2.332	4.011	− 2.789
10	BK7	30.0	3.02	− 0.121	1	0.400	0.400	0.000	− 0.240
11	BK7	30.0	3.02	− 0.112	1	0.406	0.000	0.406	− 0.353
12	BK7	30.0	3.09	0.119	27	2.803	0.994	1.809	− 1.208
13	BK7	30.0	3.09	− 0.130	49	4.887	1.835	3.052	− 2.238
14	BK7	30.0	3.08	0.031	49	4.887	1.835	3.052	− 2.231
15	BK7	30.0	3.09	− 0.176	36	6.343	2.332	4.011	− 2.931

表2 フィッティングパラメーターの決定に用いたサンプル一覧
(イオンアシスト蒸着で作製)

No.	基板				層数	コート			成膜後 面精度 (Wave)
	硝材	外径 (mm)	厚み (mm)	面精度 (Wave)		膜厚(μm)			
						合計	H	L	
		2 <i>l</i>	<i>b</i>	δ_0		<i>d</i>	<i>d</i> _H	<i>d</i> _L	δ_m
1	石英	30.0	3.07	0.036	1	0.330	0.330	0.000	0.033
2	石英	30.0	3.08	0.110	1	0.330	0.000	0.330	0.110
3	石英	30.0	3.09	− 0.095	14	0.960	0.388	0.573	− 0.242
4	石英	30.0	3.09	− 0.071	43	4.929	1.878	3.051	− 0.755
5	石英	30.0	3.08	0.085	14	3.154	1.273	1.881	− 0.376
6	石英	30.0	3.09	0.099	34	5.995	1.404	4.591	− 0.876
7	石英	50.8	12.03	0.074	34	5.995	1.404	4.591	− 0.186
8	石英	30.0	3.1	− 0.195	66	8.227	2.712	5.514	− 1.338
9	石英	30.0	3.09	− 0.127	1	0.330	0.330	0.000	− 0.219
10	BK7	30.0	3.09	0.125	1	0.330	0.000	0.330	0.045
11	BK7	30.0	3.06	− 0.083	14	0.960	0.388	0.573	− 0.370
12	BK7	30.0	3.06	− 0.042	43	4.929	1.878	3.051	− 1.468
13	BK7	30.0	3.08	0.061	49	3.154	1.273	1.881	− 0.912
14	BK7	30.0	3.1	− 0.195	49	5.995	1.404	4.591	− 1.945
15	BK7	30.0	3.1	− 0.173	36	8.227	2.712	5.514	− 2.584

パラメーターを決定した。サンプルを作製する際は、イオン銃でアルゴンイオンを加速し、薄膜材料となるTaおよびSiO₂ターゲットへ照射して多層膜を積層した。イオンビーム電圧の設定値は1200 Vである。基板を加熱する機構は付けていないが、成膜中に70℃程度まで上昇した。

反り δ_0 を計算する際、フィッティングパラメーターの初期値は1とした。 σ_H 、 σ_L 、 T_d の値は任意に入力すればよいが、今回は $\sigma_H = -200$ MPa、 $\sigma_L = -300$ MPa、 $T_d = 30$ ℃とした。多層膜の E_f 、 ν_f 、 α_f は、Ta₂O₅薄膜とSiO₂薄膜の次の値を用いて計算した。Ta₂O₅: $E_H = 136$ GPa、 $\nu_H = 0.27$ 、 $\alpha_H = 4.4 \times 10^{-6}$ 、SiO₂: $E_L = 87$ GPa、 $\nu_L = 0.11$ 、 $\alpha_L = 2.1 \times 10^{-6}$ 。これらはイオンビームスパッタで成膜した薄膜の文献値¹⁶⁾であるが、本研究とは成膜条件が異なるので後ほど4章で議論する。

サンプルの反りを図4に示した。x座標とy座標はそれぞれ計算値と測定値である。そのため、もし計算値と測定値が完全に一致していれば、印は直線 $y=x$ に乗る。図中の+印と×印のx座標は、それぞれ初期値で計算した石英基板サンプルとBK7基板サンプルの反りを示す。印はすべて領域 $y < x$ にあるので、計算値は反りを過小評価している。フィッティングパラメーターを最適化した後の反りは○印と▲印で示した。これらはほぼ直線 $y=x$ に乗っていることが分かる。回帰直線は $y=0.9993x$ 、決定係数は $R^2=0.9981$ である。(4)式の f を最小化して得られたフィッティングパラメーターの値は、 $a_{fit}=1.104$ 、 $b_{fit}=1.946$ 、 $\tau_{fit}=0.985$ であり、そのとき $f=0.042$ であった。また、すべてのサンプルについて、計算値と測定値の差は0.090以下であった。

以上の結果から、(1)式から(3)式に適切に決定したフィッティングパラメーターを入力することで、成膜後の基板の反りを $\lambda/10$ 以下の精度で計算できると解釈できる。ただし、フィッティングの範囲から、この方法が適用できるのは反りが3λ程度以下であることに注意する。また、副次的に得られる薄膜の真応力と成膜時の基板の実効的な温度は、 $a_{fit}\sigma_H =$

図4 計算値と測定値の比較(イオンビームスパッタリング Ta₂O₅/SiO₂ 薄膜の場合)

図中の印のx座標とy座標は、表1に記載されたサンプルの計算値、測定値を示す。点線は直線 $y=x$ 、実線は○と▲の回帰直線で $y=0.9993x$ である。

アメリカ光学会から許可を得て転載²⁰⁾：
Adapted with permission from [ref 20] (c) The Optical Society. (図5、図6、表1、表2も同様)

-220.0 MPa、 $b_{fit}\sigma_L = -583.8$ MPa、 $\tau_{fit}T_d = 68.9$ ℃であった。

3. 2. 2 イオンアシスト蒸着薄膜

前節と同じ手法をイオンアシスト蒸着へ適用した。膜密度を高めることや膜吸収を低減させる目的で基板を加熱して成膜する。そのため、イオンビームスパッタの場合と比べて熱応力の寄与が大きいことが予測される。表2にサンプルの詳細を記載した。基板は前節と同様に合成石英とBK7を使用し、成膜は真空蒸着機 OTFC-1300 (株)オプトラン製)を用いた。

イオンビーム電圧の設定値は、 Ta_2O_5 は 1100 V、 SiO_2 は 900 V、基板加熱温度は 200 °C に設定して成膜した。フィッティングパラメーターの初期値はイオンビームスパッタの場合と同様に $\sigma_H = -200$ MPa、 $\sigma_L = -300$ MPa、 $T_d = 30$ °C とした。フィッティング結果は、真応力の符号が測定値と合っていれば、初期値の取り方に敏感でなかった。 Ta_2O_5 薄膜と SiO_2 薄膜のヤング率、ポアソン比、線膨張係数は前節と同じ値を用いた。この値は本研究とは異なる条件で成膜された膜についての測定値なので、4 章で議論する。

サンプルの反りを図 5 に示した。 x 座標と y 座標はそれぞれ計算値と測定値である。図中の + 印と × 印の x 座標は、それぞれ初期値で計算した石英基板サンプルと BK7 基板サンプルの反りを示す。最適化する前は直線 $y=x$ 上にはないが、

図 5 計算値と測定値の比較(イオンアシスト蒸着 $\text{Ta}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2$ 薄膜の場合)

図中の印の x 座標と y 座標は、表 2 に記載されたサンプルの計算値、測定値を示す。点線は直線 $y=x$ 、実線は○と▲の回帰直線で $y=0.9993x$ である。

2つの直線に分離していることに注目する。片方は $y > x$ ($y < 0$) の領域にあり、+ 印のみで構成されているので、すべて石英基板のサンプルである。もう一方の直線は $y \approx x$ であるが $y < x$ の領域にある。× 印のみで構成されているので、すべて BK7 基板のサンプルである。硝材によって熱応力の寄与が異なることが原因である。フィッティングパラメーターを最適化した後の反りを○印と▲印で示した。石英基板と BK7 基板のサンプル共に、ほぼ直線 $y=x$ に乗っていることが分かる。回帰直線は $y=0.9993x$ 、決定係数は $R^2=0.9978$ である。(4) 式の f を最小化して得られたフィッティングパラメーターの値は、 $a_{\text{fit}}=0.727$ 、 $b_{\text{fit}}=0.696$ 、 $\tau_{\text{fit}}=6.333$ であり、そのとき $f=0.044$ であった。基板を加熱しているので、フィッティングパラメーター τ_{fit} の値が大きくなる。また、すべてのサンプルについて、計算値と測定値の差は 0.080 以下であった。

前節と同様に、反りが 3λ 程度以下の範囲において、成膜後の基板の反りを $\lambda/10$ 以下の精度で計算できると解釈できる。また、副次的に得られる薄膜の真応力と成膜時の基板の実効的な温度は、 $a_{\text{fit}}\sigma_H = -145.4$ MPa、 $b_{\text{fit}}\sigma_L = -207.0$ MPa、 $\tau_{\text{fit}}T_d = 190.0$ °C であった。

4. ディスカッション

前節では計算模型に含まれるフィッティングパラメーターを、イオンビームスパッタリングとイオンアシスト蒸着薄膜に最適化した。この過程で副次的に得られた真応力と実効的な基板加熱温度について議論する。図 6 に計算で得られた真応力と熱応力を示した。縦軸は応力、横軸はサンプル番号である。数字の下には基板の硝材を示した。多層膜サンプルの応力については、高屈折率薄膜と低屈折率薄膜の平均値を示している。イオンビームスパッタリング薄膜の真応力はイオンアシスト蒸着薄膜と比較して大きいことが分かる。一方、熱応力はイオンアシスト蒸着薄膜の方が大きい。基板を加熱した状態で成膜したことに寄ると考えられる。フィッティングで得られた実効的な基板加熱温度は $\tau_{\text{fit}}T_d = 190.0$ °C で

図 6 フィッティングに基づいて計算した真応力と熱応力

横軸の番号は、表 1 および表 2 に記載したサンプル番号、その下には基板の硝材を記した。

あった。成膜中に基板上に設置したバイメタル温度計の温度は215℃であった。近い値ではあるが異なる結果が得られたのは、計算に使用した薄膜のヤング率、ポアソン比、線膨張係数等の値と、実際の薄膜の値に差異があるためと思われる。

次に基板の種類によって、熱応力に違い出たことについて考察する。合成石英基板のサンプルについて算出された熱応力はすべて引張りであった。これは合成石英の線膨張係数が薄膜に比べて小さいからであることが、(2)式から確認できる。真応力は圧縮であるので、お互いにある程度相殺し反り量は減る。一方、BK7基板のサンプルでは状況が異なる。基板の線膨張係数が薄膜よりも大きいので、熱応力は真応力と同じ圧縮側へはたらき、合成石英基板を用いたときよりも大きな反りをもたらすことが分かる。ここで議論した応力の値に定量性はないが、定性的な議論は可能である。

5. おわりに

本研究では、成膜後の基板の反りを定量的に計算する枠組みを提案した。伝統的に使われてきたStoneyの式にフィッティングパラメータを導入し、各成膜プロセスへ最適化することで、 $\lambda/10$ 以下の精度で反りを予測できることを示した。ただし、適用範囲は3 λ 程度の反りまでであり、より大きく反る場合については今後の課題である。

光学薄膜フィルター・ミラーの製造では、本稿で紹介したように、基板の片面のみへの成膜では反りが生じるので、それを補正するためのコートを裏面にすることもある^{4),5)}。先端研究や計測器、加工機へ組み込まれる部品などでは、面精度 $\lambda/20$ 以上の要求もある。高度な要求に応じてゆくために、薄膜の物性評価や、それに基づいた製造技術の一層の向上が必要である。

(Received July 31, 2020)

文 献

1) 高橋宏寿; 眼鏡レンズコーティングの最新動向 一眼の健康を考

- 慮した眼鏡レンズコーティング, OPTRONICS, No.10, (2019).
- 2) 松ヶ谷和沖; デンソーテクニカルレビュー, **21**, 13 (2016).
- 3) 小檜山光信; 光学薄膜フィルターデザイン(オプトロニクス社, 2006).
- 4) T. Amotchkina, M. K. Trubetskov, Y. Pervak, L. Veisz, V. Pervak; *Optics Express*, **22**, (24), 30387 (2014).
- 5) T. Begou, J. Lumeau; Optical Interference Coatings 2016, TD5 (2016).
- 6) K. Scherer, L. Nouvelot, P. Lacan, R. Bosmans; *Applied Optics*, **35**, (25), 5067 (1996).
- 7) T. Nishikawa, H. Ono, H. Murotani, Y. Iida, K. Okada; *Applied Optics*, **50**, (9), C210 (2011).
- 8) M. Takegami, R. Nakano, H. Murotani; *Applied Optics*, **56**, (4), C96 (2017).
- 9) G. G. Stoney; *Proc. R. Soc. London, Series A*, **82**, 172 (1909).
- 10) A. Brenner, S. Senderoff; *Journal of the Research of the National Bureau of Standards*, **42**, 105 (1949).
- 11) R. W. Hoffman; *Physics of Thin Films Vol. 3*, p.211 (Academic, New York, 1966).
- 12) 金原 榮; 真空・薄膜 徒然草, p.43 (アグネ技術センター, 2013).
- 13) 小倉繁太郎(訳); 光学干涉コーティング 基礎編, 第9章(丸善プラネット, 2019).
- 14) 青木智則; 神戸芸術工科大学 博士論文(1999).
- 15) C.-C. Lee, C.-L. Tien, W.-S. Sheu, C.-C. Jaing; *Rev. Sci. Instrum.*, **72**, (4), 2128 (2001).
- 16) E. Çetinörgü, B. Baloukas, O. Zabeida, J. E. Klemberg-Sapicha, L. Martinu; *Applied Optics*, **48**, (23), 4536 (2009).
- 17) 杉浦宗男; 光学薄膜セミナー 光学薄膜の膜応力と光学系へ与える影響, オプトロニクス社 光とレーザーの科学技術フェア2015, 光学薄膜セミナー TF-12
- 18) A. E. Ennos; *Applied Optics*, **5**, (1), 51 (1966).
- 19) K. Hendrix, J. D. T. Kruschwitz, J. Keck; *Applied Optics*, **53**, (4), A360 (2014).
- 20) M. Sugiura, K. Tamura, M. Kobiyama; *Applied Optics*, **59**, (5), A92 (2020).