

反射位相制御光学素子のための光学薄膜生成の研究

米田研究室 引地 学

1. はじめに

回折格子やプリズムといった固定分散のものと違い、理論上、任意のバンド幅・分散を補償できるチャープミラーは、超短パルスレーザーの分散補償を行う光学素子として最も有効である。サブ10fsの超短パルス光発振器には、現在必須の光学部品となっている[1][2]。特に最近では、1オクターブ以上のバンド幅に対して分散補償が可能なチャープミラーの設計まで行われている[3][4]。このようなミラーは、これまでの分光反射率のみを評価関数としてきた光学から、反射位相まで評価関数に取り入れたものが実用段階に入ってきたことを意味する。

一方、光学薄膜作成時にはこのように“分光反射率”から“分光位相”まで含めた素子に変わっているにも関わらず、通常、膜厚計測のみが測定され、光学薄膜設計により導出した光学膜厚に近づけるように制御され作成されている。このようなモニタ法では位相情報を取り扱っていないため、数十層に及ぶ多層膜の場合、各層でのわずかな位相誤差も加算されてしまい、全体として大きな誤差を生じる[5]。前述のチャープミラーにおいて、最後の層は10nmかそれ以下の非常に薄い層で構成され、反射位相はこの薄い層でも敏感に左右されるが、もし仮に、最終層以前の位相誤差を数nm以下に抑えられているのであれば、最後の層の膜厚を変えて全体の位相誤差を最小にすることができる。

そこで、本研究では、白色光干渉計を成膜装置内に入れ、成膜時にin-situ位相計測と光学厚み計測双方を行う成膜システムを提案している。この原理実証のため、まず計算機による膜厚、位相エラーの影響を調べ、その制御性の定量評価を行った。さらに、大きな振動や高温の熱輻射を有する成膜装置内の悪環境下で位相計測が可能な白色光干渉計測システムの開発を行い、実際に成膜中のin-situ位相計測を行った。

2. 原理実証のための光学薄膜準備

まず、成膜中のin-situ位相計測の原理実証を行う上で、最低限必要な光学薄膜の準備とその特性を求めた。原理実証を行うために求められることは、以下の3つである。(1) 低損失な高屈折率、および低屈折率誘電体薄膜の屈折率把握、(2) 膜厚制御精度の把握、(3) 50層以上の超多層膜成膜に耐える基板準備。この3つの要求を達成するため、次のような実験を行った。

まず、本研究では誘電体材料として、本研究の測定領域である近赤外の波長で良好な機械的強度と安定性を持つTiO₂とSiO₂を用いるが、このような誘電体薄膜の特性は成膜装置依存性を持つため、本研究で使用する電子ビーム蒸

着器 (BMC-800T、(株)シンクロン) 固有の屈折率分散曲線を見積もらなければならない。そこで、電子ビーム蒸着器の制御因子である酸素導入量 (TiO₂は成膜中に酸素が枯渇してしまうため、適切な酸素雰囲気中で成膜を行わなければならない)、およびフィラメント電流値 (成膜レートを調整する) を変えたいくつかの成膜シリーズを作成し、分光光度計 (Spectrophotometer Model 200-10、(株)HITACHI) を用いた透過率分光測定を行うことによって、最も低損失となった時のTiO₂、およびSiO₂薄膜に対して図2. 1のような屈折率分散曲線を得た。なお、この時の成膜条件は、フィラメント電流値 250mA (成膜レート約 3×10⁻⁸l/min)、酸素流量 116sccm である。図中左側のグラフは、TiO₂の屈折率分散を表わしており、赤が測定したデータ点、緑がそのデータ点の近似曲線、青が本研究で使用する光学薄膜設計ソフト (Essential Macleod, Thin Film Center Inc.) のデータベースの屈折率分散である。データベースと測定データとの屈折率差は、電子ビーム蒸着による膜の充填密度の低さによるものと推測される。また、図中右側のグラフは、SiO₂の屈折率分散を表わしており、赤がデータ点、青がその近似曲線である。SiO₂の場合、その特性はあまり成膜条件に依存せず、データベースとの屈折率差もほとんどなかったため、波長 628nm の He-Ne レーザーで測定したエリプソメトリの結果を基に屈折率分散曲線をフィッティングさせている。

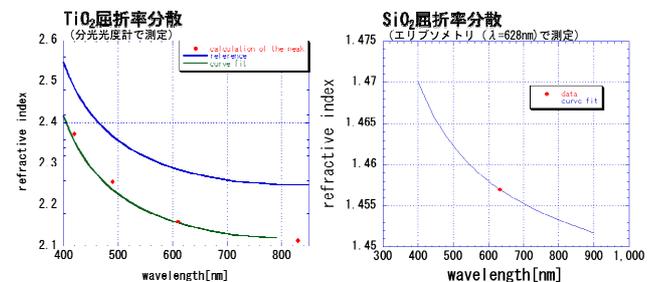


図2. 1 測定したTiO₂とSiO₂の屈折率分散

次に、膜厚制御精度を把握するため、TiO₂とSiO₂をλ/4膜厚で交互に25層積層させた、垂直入射において中心波長508nm高反射誘電体多層膜コーティングを作成し、理論設計と比較した。その結果を図2. 2に示す。図2. 2は、左が作成した高反射誘電体多層膜コーティングの透過率スペクトル、右がコーティングデザインにいくつかの誤差を与えて計算した理論設計上の透過率スペクトルである。なお、この計算は、以下に示すように、コーティングデザインを2つのセクションに分け、それぞれに1-α、1+αの膜厚誤差を与えて行っており、グラフ中に示されているのは、α=0.5%, 0.8%, 1%, 5%, 10%に対して計算した透過率スペクトルである。

$$S \left| (H_1 L_1)^\alpha (H_2 L_2)^{1-\alpha} H_3 \right| A$$

ここで、Sは基板、Aは空気（コーティングに対する周囲媒質）、HとLは高屈折率（TiO₂）、および低屈折率（SiO₂）のλ/4膜を表わしており、HとLの下の添え字は膜厚が異なることを示している。

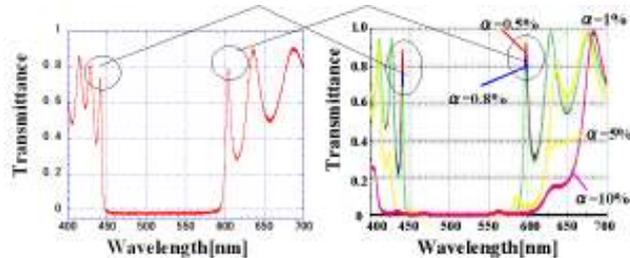


図2. 2 作成、および理論設計した高反射誘電体多層膜コーティングの透過率スペクトル比較

さて、αの値を変えた時の理論設計の透過率スペクトルにおいて、その影響が最も顕著に現れるのは、高反射領域から透過領域への立ち上がり部分、つまり、グラフ中のマルで囲った部分である。そこで、その位置に重点をおいて両者を比較したところ、作成した高反射誘電体多層膜コーティングの透過率スペクトルを最もよく再現したのは、α=0.8%の場合であった。この値は、膜厚に換算すると、約1nmに相当する。したがって、膜厚の制御精度は、高反射誘電体多層膜コーティングの機能を失わないという意味で、許容範囲内の成膜膜厚誤差を達成していることがわかった。

最後に、50層以上の超多層膜成膜に耐える基板の準備として、基板の洗浄方法を確立した。一般に、基板表面に汚れが付着していると、膜の付着性の低下や平坦性の崩壊をもたらし、最悪の場合成膜中に膜が剥離してしまうため、そのようなよごれは極力取り除かなければならない。そこで、本研究では、次のような基板洗浄方法を採用した。まず、レンズクリーニングペーパー（クリーニングペーパーKind R-1、小津産業）とアセトンを用いて目視できる程度の大きな汚れを取り除く。次に、スピנקリーナーと特殊な綿棒（軸が有機溶剤に耐性を持つ、100%綿製の接着剤フリー綿棒）を用いてクリーニングペーパーでは取りきれなかった汚れを取り除く。なお、スピנקリーナーとは、当研究室で以前開発した洗浄方法[6]で、回転の遠心力を利用して洗浄有機溶剤を吹き飛ばすため、引っ張り洗浄よりも効果的な基板洗浄が可能になる。この装置は、対象基板を油汚染の無いダイヤフラムポンプで回転治具上に真空吸着し、その回転治具をスピナー用モーターにより3000~4000rpmの速度で回転させるものである。回転治具は、有機溶剤による汚染や溶解を避けるため、テフロン製にしてある。具体的な洗浄方法としては、先程述べた綿棒を洗浄有機溶剤に浸し、回転させた基板面の中心付近から外周に向けて押し付けながら拭くという方法である。

最後に、レンズクリーニングペーパーとスピנקリー

ナーによって汚れをある程度取り除いた基板を超音波洗浄にかける。なお、洗浄溶剤には、半導体ウエハ洗浄用のイソプロピルアルコールを使用し、1時間を1セットとして合計で3回の超音波洗浄を行う。このように入念な基板洗浄を行うことにより、1μm以上の大きさの汚れに対して、製品を上回る汚れの除去が達成された。なお、この測定は、顕微鏡を用いて実際に汚れの延べ総数をカウントすることによって行った。

このようにして準備された基板に対して膜の付着性をチェックするため、一例として、可視のブロードバンド高反射誘電体多層膜コーティングを作成した。そのデザインを以下に示す。

$$S \left| (H_1 L_1)^{10} H_1 L_3 (H_2 L_2)^{10} H_2 L_5 (H_4 L_4)^{10} H_4 \right| A$$

ここで、添え字1,2,3,4,5は、それぞれ中心波長700nm,600nm,650nm,508nm,554nmに対応しており、L₃とL₅は、高透過谷の発生を防ぐために挿入した低屈折率膜である。このブロードバンド高反射誘電体多層膜コーティングは、波長450nm~800nmのバンド幅全体で99%以上の高反射領域を持つように設計されている。図2. 3に実際に作成した高反射誘電体多層膜コーティングの透過率スペクトルと蛍光灯の光を反射させたときのコーティング表面、および蛍光灯を透かして見たときの様子を撮影した写真を示す。図2. 3の結果から明らかなように、設計通りのブロードバンド高反射誘電体多層膜コーティングが作成されたことがわかる。そのため、上で述べたような洗浄方法を行って準備した基板に対して、今回のような65層の成膜は十分に可能である。したがって、in-situ位相計測の原理実証に要求される50層以上の超多層膜成膜に耐える基板準備としては、十分な成果が得られたといえる。

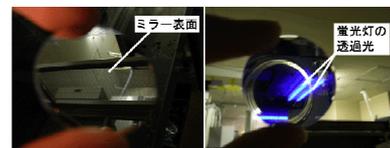
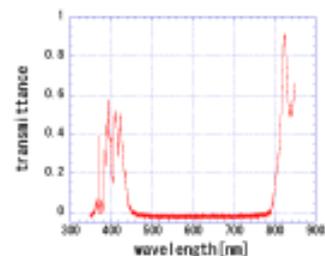


図2. 3 作成したブロードバンド高反射誘電体多層膜コーティングの透過率スペクトルとその様子

3. GDD変動の見積りと成膜中の膜厚補正

次に、膜厚に対する位相の制御精度、大きさを知るために、光学薄膜設計ソフトを用いて、構造の単純なチャープミラーを対象に、膜厚誤差の位相への影響と、膜厚を変え

ることによる修復性を評価した。

まず、膜厚に対して GDD(Group delay dispersion)がどの程度変動するかを調べるため、次のような解析を行った。図 3. 1 は、中心波長 800nm、750nm~900nm のバンド幅全体で、各スペクトルに対して GDD -30fs^2 の分散を補償するように設計した最も単純なチャープミラーデザイン、およびそのチャープミラーの 25 層目の物理膜厚を 24 層目から 1nm ずつ増加させた時の各波長に対する GDD の推移を表わしている。なお、このチャープミラーは、25 層の $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$ ペアで構成されており、各層の物理膜厚が図 3. 1 のグラフに示されている。グラフにおいて、黒が TiO_2 層、白が SiO_2 層を表わしており、その層数は、ガラス基板 (BK7) 側を 1、周囲媒質と接するコーティングトップを 25 としている。

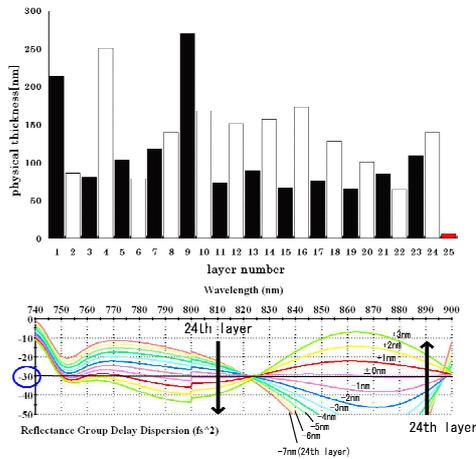


図 3. 1 チャープミラーデザインと膜厚変化に対する GDD の推移

さて、図 3. 1 の GDD の推移を見ると、本来の設計上の膜厚 (物理膜厚で 7nm) における GDD は 750nm-900nm のバンド幅全体でほぼ一定となっている。また、波長によって変動の大きいところ (腹) と変動の小さいところ (節) が存在しており、特に変動の大きな部分 (850nm-880nm) では、 $\pm 1\text{nm}$ の物理膜厚の変化に対して GDD は $\pm 10\text{fs}^2$ の変動をしている。したがって、わずか 1nm の物理膜厚変化に対して GDD は 30% も変動することがわかった。

次に、in-situ 位相計測によって成膜中の補正が可能かどうかを調べるため、次のような解析を行った。図 3. 2 は、先程のチャープミラーデザインの各層に $+2\text{nm}$ 、全体で $+50\text{nm}$ (平均約 2%) の膜厚誤差を与え、それを 25 層目の膜厚を変えることにより正規の GDD 特性に近づけるよう補正を行ったチャープミラーデザインの GDD の計算結果である。グラフに示したように、一般に、電子ビーム蒸着において成膜中に見込まれる平均約 2% という膜厚誤差に対して、正規デザインの 25 層目の膜厚 7nm を 8nm にすることによって望ましい分散特性から 10% 以内の GDD 補正を達成することができた。以上の結果から、ここで提案している白色干渉計のレベルで十分成膜中の GDD エラーの補正が可能であることがわかった。

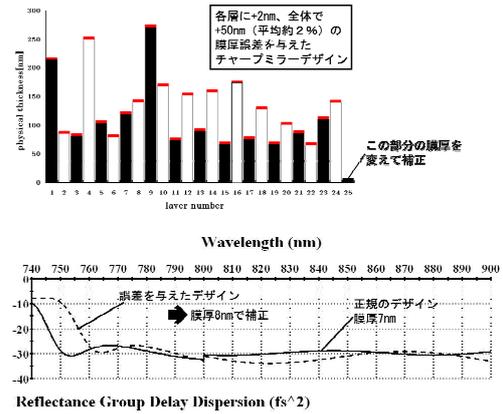


図 3. 2 膜厚を変えて GDD エラーを補正した解析結果

4. in-situ 位相計測システムの開発

次に、本研究で提案する成膜中の in-situ 位相計測を実現するための白色干渉計測システムの開発を行った。

白色干渉計を成膜装置内に導入する場合、振動と熱の影響が問題となる。また、この計測は真空中で行われるため、干渉計システムの真空対策も必要となる。まず、振動に関しては、成膜時の真空ポンプ駆動や基板取付け用回転ドームの 1200rpm の高速回転といった機械的な振動が真空チャンバーの床からブレッドボードに伝わり、ブレッドボード自身の振動の加速度を受けて干渉計構成部品全体が振動する。一般に、このような振動は、振動周波数 KHz 以下の非常に大きな振動である。一方、CCD カメラ、伝送線、モニタを含めた CCD カメラシステムの応答速度は ms (ミリ秒) 以上であるため、このような大きな振動を CCD カメラが拾ってしまい、干渉フリンジが見えなくなってしまうという問題が生じる。また、熱に関しては、成膜中の数千°C もの輻射熱によって干渉光学系を固定しているアルミのブレッドボードが熱膨張を起こし、容易に光源の可干渉距離から外れてしまうという問題が生じる。また、このような高温の輻射熱により、金属ミラーの融解や CCD カメラシステム等の測定系の破壊もたらす。

そこで、このような技術課題に対し、次のような対策を講じた白色干渉計測システムの開発を行った。まず、図 4. 1 に成膜装置内に導入した白色干渉計測システムを示す。図中の略記は、M1,M2 が干渉計の 2 つの参照ミラー、BS がビームスプリッター、C が補正板、CL1,CL2,CL3 がカメラレンズを表わしている。なお、輻射熱によるミラーの融解を避けるため、この白色干渉計測システムに使用しているミラーは、全て赤外ブロードバンド誘電体多層膜ミラー (BND-10、AUTEX) を使用している。また、重力によるミラーマウントのばね振動の影響を軽減するため、図中に示したように、全てのミラーマウントは重力に逆らう方向に向けられている。この白色干渉計測システムは、真空チャンバー内に縦置きされており、真空チャンバーの

床の上に固定されている。真空チャンバーの床から参照ミラーM1までの高さは約60cmで、蒸着源から参照ミラーM1までのコーティングパスが確保されている。これにより、参照ミラーM1に対して成膜と干渉計測が同時に行えるようになっている。なお、参照ミラーM1は取り外し可能で、φ25.4の任意のサンプルを設置することができる。ここで使用しているビームスプリッターは、自作のビームスプリッターで、その透過率スペクトルが同図中に示されている。また、ビームスプリッターの基板の厚みを補正するため、BK7の補正板がビームスプリッターと参照ミラーM2との間にビームスプリッターと平行に挿入されている。参照光は、真空チャンバー外部に置かれた光源からコア径100μmのマルチモードファイバを用いて干渉計内に導入されている。ビームスプリッターから各参照ミラーまでの（物理）距離は約10cmで、φ25.4の参照ミラー全面が光が照らしている。再びビームスプリッターによって重ね合わされた光は2つのミラーで反射され、φ25.4, f=50の赤外用アクロマティックレンズで集光される。このアクロマティックレンズは、参照ミラー表面の像を集光位置に像転送するよう配置されている。以前は、このレンズの集光位置付近に入射スリットを設置していたが、スリットにおける光量のロス为了避免のため、今回はスリットを外している。集光位置から後ろ側のφ25.4, f=50の赤外用アクロマティックレンズ、1200L/mm, 3cm×3cmのグレーティング、φ40, f=50のカメラレンズは、分光器を構成しており、それぞれ焦点距離50mmの間隔で配置されている。さらにその後ろ側のミラー3枚、カメラレンズ2個によって縮小光学系を構成しており、波長方向に分解された140nmのバンド幅全体をCCDサイズ内に縮小投影している。ここで使用しているカメラレンズはどちらもφ50, f=50であり、CCDカメラはデジタルCCDカメラを使用している。

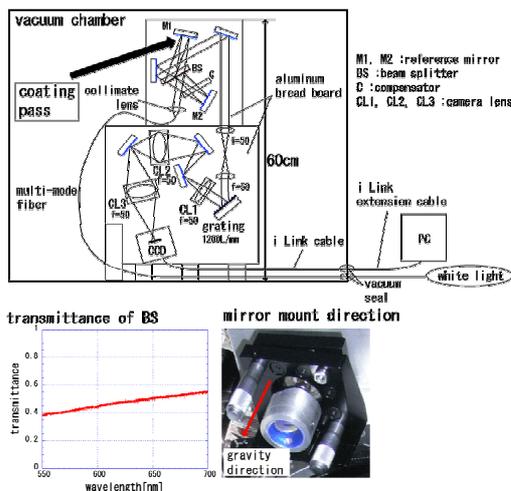


図4.1 成膜装置内に設置した白色光干渉計測システム

さらに、振動と熱に対して次のような対策を行った。まず、振動に関しては、光源をCWのハロゲンランプから白色パルス光源に置き換えた。一般に、振動は物質中を音として伝播するため、このような振動の周波数は、先に述べ

たように、音の領域であるKHz以下の帯域、および超音波の領域であるMHzの帯域である。本研究において想定される振動は、ブレッドボードの振動による干渉計構成部品の加速度振動、および参照ミラー自身の振動である。前者がKHz以下の大きな振動、後者がMHzの微弱な振動である。なお、上で述べたように、干渉計測における振動の問題はCCDカメラによるノイズの重畳であることから、MHzの微弱な振動は、干渉計測においてそれほど大きな弊害とはならない。したがって、このような振動は、μsオーダーの発光時間を持つパルス光源を使用することにより、その影響を無視する事が可能になる。そこで、本研究では、μsオーダーの発光時間を持つ白色パルス光源としてキセノンフラッシュを使用する。これは、市販されている普通の使い捨てフィルムカメラのフラッシュとして使われる光源で、単3電池1本(1.5V)で駆動できる非常に安価な白色パルス光源である。なお、本研究で使用するキセノンフラッシュは、電荷の充電に330V, 120μFのフォトンフラッシュ用電解コンデンサを使用しており、その充電時間は約25秒である。電源には10Vまでの安定化電源を使用し、1.5Vをキセノンフラッシュ回路に印加している。図4.2に本研究で使用する白色パルス光源とこの光源を使用したことによって得られた、ドーム回転前、およびドーム回転時の干渉フリンジ画像を示す。図4.2に示したように、ドーム回転前とドーム回転時で干渉フリンジは変化していないことがわかる。したがって、安価な白色パルス光源によって振動の課題を克服することができたといえる。

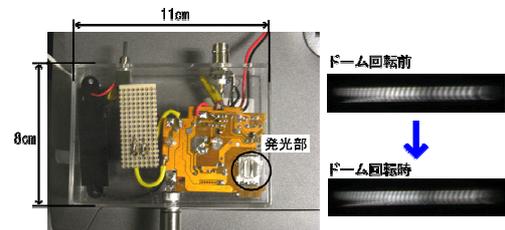


図4.2 白色パルス光源とこの光源の使用によって振動の影響を克服した干渉フリンジ画像

次に、熱に関しては、白色光干渉計測システム全体を冷却、かつシールドし、その上で、外部からの放射熱を反射する機構を作成することによって問題の解決を試みた。一般に、真空中の加熱は、熱源からの放射によるのみ生じる。そのため、そのような放射熱を反射させることができれば、対象物の加熱を防ぐことができる。そこで、本研究では、次のような機構を開発した。

まず、図4.3に示すような、ヒートパスを用いて干渉計測システム全体を覆っている。このヒートパスは、厚さ1mmの銅板で構成され、真空チャンバー内で流水冷却されている冷却棒に熱が逃げるようになっている。これにより、干渉計測システム全体の温度が比較的低い温度で一定に保たれている。図4.3にあるように、ヒートパスとブレッドボードとの固定は、ブレッドボードと同じピッチで銅板に開けられた直径6mmの穴を通してブレッドボード裏面

から固定されている。また、冷却棒との固定は、冷却棒と銅板との接触面積を稼ぐため、約 30cm の銅板の先端を冷却棒に巻きつけ、その上から、冷却棒よりも 3mm だけ直径の大きなアルミパイプをC型にカットしたものを差し込んで固定している。さらに、振動の影響を防ぐため、干渉光学系を固定している上側のブレードボードに取り付けられたヒートパスは、厚さ 1mm の銅板と厚さ 2mm のアルミ板を張り合わせて補強されている。

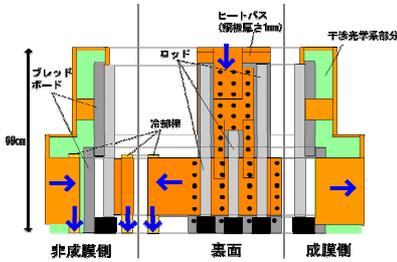


図 4. 3 ヒートパスの構造

次に、図 4. 4 に示すように、ヒートパスを含めた干渉計測システムとは熱的に完全に独立した状態で、熱シールドを設けている。この熱シールドは、1mm の銅板の片面にアルミ箔を貼ったもので、加熱ヒーターや蒸着源からの輻射熱を反射する役割を果たしている。熱シールドを構成する銅板は、ヒートパスが繋がっているものとは別の冷却棒に繋がっており、熱シールド全体を冷却している。この熱シールドの蒸着側には、蒸着源と in-situ 位相計測用参照ミラーとの蒸着パスを確保するための蒸着窓が設けてあり、干渉計構成部品の中でこの参照ミラーのみが成膜されるようになっている。そのため、便宜上、熱シールドは蒸着窓を持つ上部分と下部分とが別々に設置されている。熱シールドの頂上部分における真空チャンバーの床からの高さは 70cm で、ヒートパスの最上部から 1cm の距離を置いた位置に別の直径 5cm のアルミロッドを用いて固定されている。また、熱シールド下部分は、真空チャンバーの床部分に元々切ってあるいくつかの M8 雌ネジを活用して柱を立てることにより固定している。

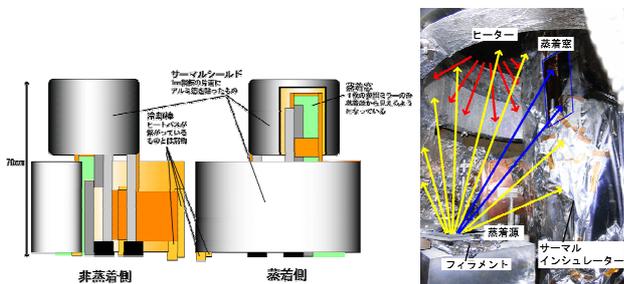


図 4. 4 熱シールドの構造と成膜装置内の外観

さらに、輻射熱の反射、および干渉計構成部品の保護の効果を高めるため、サーマルインシュレーター（アルミと絶縁体が交互に積層されたシート）を用いて、蒸着窓を確保しつつ、熱シールドの上からぐるぐる巻きに覆っている。

以上のような対策により、振動と熱に対する課題を克服

することができ、高温真空という成膜時に必要とされる条件下において、安定な干渉フリンジを長時間に渡って持続させることに成功した。図 4. 5 にその時の結果を示す。図 4. 5 は、成膜開始時の真空室内環境に相当する、真空室内周囲温度約 250°C、真空度 $8.0 \sim 7.5 \times 10^{-5}$ Torr という状況下で各時間において計測した干渉フリンジの縞の本数を表わしたグラフである。グラフから明らかなように、成膜環境下で 1 時間放置した後でも、干渉フリンジの縞の本数はほとんど変化しておらず、安定していることが読み取れる。したがって、成膜中の in-situ 位相計測を行うための計測システムの開発に成功したといえる。

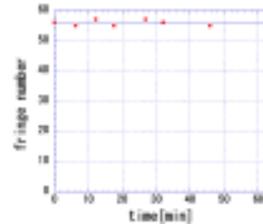


図 4. 5 成膜条件下で得られた干渉フリンジの安定性

5. 成膜中の in-situ 位相計測

成膜環境下において長時間に渡って安定な干渉フリンジが得られる白色光干渉計測システムを準備することができたので、次に、実際に誘電体材料の成膜を行いながら、各成膜ステップにおいて位相計測を行い、本研究で提案する成膜中の in-situ 位相計測の原理実証ができるかどうか検証を行う。

さて、図 4. 5 に示したように、成膜開始前の前段階における干渉フリンジの安定性はすでに確認されているため、図 4. 5 の状態から引き続き、 SiO_2 の成膜を行った。その結果を図 5. 1 に示す。図 5. 1 は、左のグラフが光学式膜厚モニタから出力された成膜中の相対反射光強度の推移をあらわしており、右の各写真が、各成膜ステップにおいて撮影された干渉フリンジ画像である。各成膜ステップ時間とともに表記されているのは光学式膜厚モニタから推測される SiO_2 の膜厚で、44 秒を成膜開始位置とし、そこからの各ピーク時の出力値から膜厚を換算している。 SiO_2 の成膜は、何も成膜していない BK7 ガラス基板に行っており、光学式膜厚モニタは、655nm の干渉フィルタを使ってモニタしている。さて、図 5. 1 を見ると、若干干渉縞がぼやけて見えるステップがあるものの、各成膜ステップにおいて撮影された干渉画像からは、バンド幅全体で十分に明暗のフリンジパターンを確認することができる。そのため、このような干渉フリンジ画像から、位相、および GDD を求めることは十分可能である。したがって、ここから、開発した白色光干渉計測システムは、数千°C の誘電体材料が飛び交う成膜中であっても干渉計測を行うことが可能であるということがいえる。

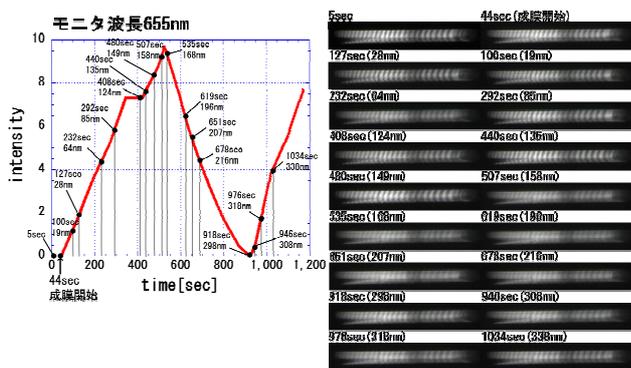


図 5. 1 各成膜ステップで撮影された干渉フリンジ画像

次に、各成膜ステップにおいて撮影された干渉画像を解析し、測定波数全体でのトータル位相を求めた。各成膜ステップに対して求められた結果を図 5. 2 にまとめた。図 5. 2 は、各成膜ステップでの波数に対するトータル位相を表わしており、凡例は、図 5. 1 で示した各成膜ステップの時間に対応している。さて、グラフより、各成膜ステップで計測されたトータル位相それぞれは、全て、ほぼ直線状になっていることが分かる。しかし、各成膜ステップ、それぞれのトータル位相を比較すると、明らかに直線の傾きがシフトしていることがわかる。このトータル位相の傾き、つまり波数に対する 1 次の線形成分の変化は、干渉計内において 2 つの腕の長さが変化したことを表わしている。本研究において干渉計の腕の長さが変化するのは、片方の参照ミラー自身が動いた場合、および、参照ミラーを構成する誘電体の膜厚が変化した場合の 2 通りである。しかし、前者に関しては、図 4. 5 に示したように、成膜前の 1 時間でフリンジの本数はほとんど変化しておらず、非常に安定した干渉フリンジが得られていることが確認されており、ミラー自身が移動したとは考えにくい。そのため、今回計測された傾きの変化は、参照ミラー表面に SiO₂ が成膜されたことによるものであるといえる。したがって、ここから、成膜中の in-situ 位相計測が達成されたという結論が得られたことになる。

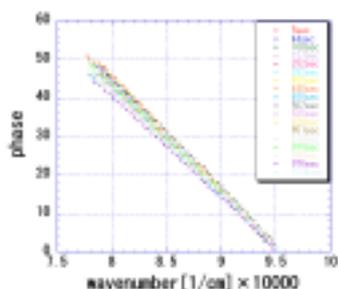


図 5. 2 各成膜ステップにおいて求めたトータル位相

次に、求めたトータル位相から GDD を求めた。その結果を図 5. 3 に示す。なお、図中の凡例は、図 5. 2 同様、図 5. 1 で示した各成膜ステップの時間に対応している。さて、図 5. 3 を見ると、時間変化、すなわち参照ミラー上に成膜された SiO₂ の膜厚変化に対して、GDD 変化は波

長によって腹（変化量が大きい部分）と節（変化量が小さい部分）に分かれ、腹の部分では大きく GDD が変動するという、図 3. 1 に示した計算結果と一致していることがわかる。したがって、計算結果と実験結果が一致したという事実から、in-situ 位相計測の原理実証がなされたという結論を得る。

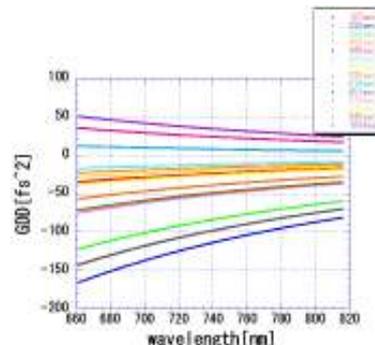


図 5. 3 各成膜ステップで求めた波長に対する GDD

さらに、具体的な GDD 変動の大きさを把握するため、図 5. 3 において GDD 変動の腹の部分に相当する波長 680nm に着目したところ、GDD 変動は、peak to peak で約 4.0% であることがわかった。

6. 結論

これまでの研究において次の 2 つの成果が得られた。

1. 成膜時の in-situ 反射位相計測によって成膜中に生じた GDD を補正することが可能であることが解析的に求められた。
2. 成膜中の in-situ 位相計測の原理実証がなされた。また、今後残された課題としては、次のようなものがある。
 - 成膜中に測定した GDD と真空開放した後の GDD との間の偏差を見積もり、その影響の程度を把握する。
 - 本来の要求である 10nm 以下の膜厚に対する反射位相計測に向け、測定精度を高めていく。
 - 位相→GDD 変換の自動化によって、体系的に膜厚と結びつけた GDD 計測が可能なシステムの開発を目指す。

これらにより、誘電体多層膜光学素子における反射位相の in-situ 計測・制御の有効性を示すことが可能になり、今後より複雑な位相スペクトルを持つ光学素子開発にも応用できるようになると考えている。

参考文献

- [1] R. L. Fork, et all, Opt.Lett. **9**, 150 (1984).
- [2] R. L. Fork, et all, Opt. Lett. **12**, 483 (1987).
- [3] G.Steinmeyer, Appl.Opt, **45**, 1484(2006).
- [4] V. Pervak, et all, Opt Lett, **32**, 1183(2007).
- [5] G. Tempea, et all, J. Opt. Soc. Am.B **18**, 1747 (2001).
- [6] 植田憲一、他、「サブヘルツ安定化レーザーを用いた超高性能光学素子計測技術の開発とその応用」、平成 8・9 年度科学研究費補助金基盤研究 A(1)研究成果報告書（平成 10 年）。