

光学コーティング仕様を定める際の計測上の留意点

ピート・クピンスキ、アンガス・マクレオド

光学コーティングの設計、仕様、調達のすべてにおいて、設計者が計測技術および不確かさを十分に理解していることは重要である。

光薄膜コーティングの性能を正確に計測することが、その設計や製造と同様に難しくなることがある。光学コーティング仕様を定めて調達するとき、計測技術と計測不確かさを理解することは、光学系設計者にとって重要である。ここでは、光学系設計者、品質エンジニア、調達担当者のための光学コーティング計測を簡単に紹介する。その過程で、光学系の仕様化の際にコーティングエンジニアが質問される、ごく一般的な計測の問題にも若干触れたい。

性能の計測方法の理解

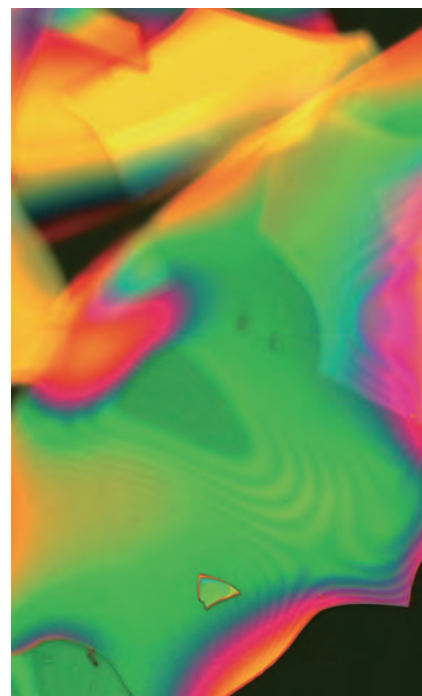
これから挙げるのは、システムパフォーマンスに大きな影響を及ぼす可能性がある、単純な計測の見落としの一例である。この例は、コーティングされた光学部品を購入する際に、計測がどのようにされていたかについて、すべき質問を明らかにすることを目的としている。

この例では、システム設計者は、システムに光フィルタを入れることに関心を持っている。そのシステムは、350～450nm 波長帯域では反射強度が最低限99%、それより長い波長では99%以上を透過する。コーティングエンジニアは、使用した分光光度計の計測不確かさの範囲内で、過去のコーティング構成材料の単層の損失を計測し、フィルタのどの層にも散乱や吸収がほとんどないと判断した。

いったんコーティングされると、透過だけでパフォーマンスがテストされ報告されるなら、フィルタの広帯域ミラーやパスバンド領域は、いずれも設計者の許容範囲に入っているように見える。しかし広帯域誘電体ミラーでは、透過対反射で計測するとパフォーマンスが大きく違う可能性がある。広帯域誘電体ミラーは多層スタック内に共鳴構造を作り出し、ある波長ではそこで増幅が起こる。個々のコーティング層の極めて小さな損失でも、こうした共鳴周波数ではそのフィルタにとっては大きな損失になる。透過で計測すると、この共鳴損失は阻止にプラスの影響を与えており、ミラーは実際よりも優れているように見える(図1a)。反射で計測すると、この同じ共鳴が可視スペクトルにわたり、反射に明確で大きなリップルを作り出し、結果的にそのコーティングはミラーの仕様を満たしていないことになる(図1b)。

反射パフォーマンスの計測

分光光度計は、ほとんどの光学コーティング実験室で最優先のツールとなっている。レーザーベースの計測システムと比べると分光光度計は、多様性と価格の点で優位性があり、適切に使用すると非常に効果的になることがある。ほとんどのコーティング会社は市販の分光光度計を使用している。標準機能には、グレーティングベースのモノ



誘電体多層スタックコーティング、計測では厚さ全体は0.5 μm。コーティングは、イメージング前に意図的に光学面から取り除いた。画像は、Nomarski顕微鏡を使って200倍で撮った。

クロメータ、光源やディテクタのドリフトに対処するための基準ビームがある。

以下の議論は、市販の分光光度計の一般的な留意点であることに注意する必要がある。場合によっては、光学コーティング会社は、特殊なアプリケーション向けに、一般的な計測装置に対して計測的優位性を持つ独自の分光光度計を開発する。

市販の測定装置では、利用できる付属品(アクセサリ)は非常に多い。こうした付属品のそれぞれが、計測タイプが違えば一長一短を持つ。これらの付属品とその長所短所の全体を観望することは、この記事の範囲を超える。ここでは、分光光度計で計測する際の

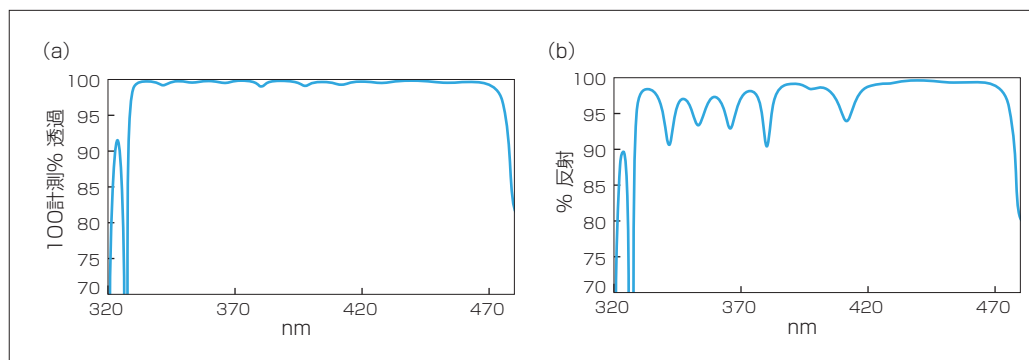


図1 スペクトル計測は、多層広帯域誘電体ミラーの(a)透過と(b)反射を示している。反射で計測されたミラーのリップルの原因は、共鳴と増幅された損失によるものである。

一般的な留意点についての理解促進に集中する。

分光光度計で計測するためには、関心のある波長帯域にわたりテスト面と比較して強度が小さい場合、大きい場合の両方で基準測定する。次に、ディテクタ固有の式を用いて、個々の波長で計測信号とこの範囲内のサンプル強度との相互関係を比較する。この計算に関連する不確かさは、ディテクタの非線形性によるエラーとされることが多い⁽¹⁾。最も単純な場合には、基準計測は、阻止されたビーム(強度0%)と開放ビーム(強度100%)で行われる。

光度計、すなわち縦軸の不確かさは、部分的には、基準計測で使用される範囲の関数である。例えば、反射防止(AR)コーティングの表面を反射で計測すると、開放ビームの代わりに、高い信号基準として厳しくコントロールされた屈折率のガラスの単一面反射を使用することでディテクタの非線形性の不確かさが減少するのは常識である。ショット(SCHOTT)N-BK7ガラスは、屈折率が安定していることから、一般に用いられている。

市販システムの波長の不確かさは、極紫外(UV)から近赤外(NIR)波長まで、一般に±0.3%以下である。関心のある波長範囲で、ランプ輝線あるいは鋭い吸収ピークを示すようにドープしたトレーサブルなガラス基準を使っ

て波長の校正をチェックすることは、比較的簡単である。

分光光度計ベースの透過計測

光学コーティングの計測で基本的な課題の1つは、ARコーティングとミラーコーティングとを透過と反射それぞれで正確かつ精密に計測することが難しいということである。以下の点は、分光光度計を使ってAR面の透過性を計測するときの大きな誤差の原因から2つを取り上げている。

1. AR面の反射計測では、光度計の正確さにおける小さな誤差は、コーティング性能の一般にあまり重要でない測定誤差と同じである。例えば、入射光の0.1%しか反射しない表面の計測された反射強度誤差の1%は、テスト面では、計測の不確かさ0.001%と同じである。透過(T)における同じ誤差は、はるかに重大問題になる。99.9%透過で1%の誤差は、透過の不確かさでは約1% Tに等しい。
2. ディテクタは空間的に可変であることが多い。基準からサンプル計測まで、ビーム位置のわずかな変化の影響は反射計測では小さいが、透過計測では、大きい。それはポイント1に説明した理由による。ビームの位置がベースラインとサンプル計測との間で変わると、計測の正確さは悪化する。ビームパスの変化はもっと

深刻になる。それはサンプルの厚さ、屈折率、計測角度が増すからである。ビーム位置の変化度はスネル(Snell)の屈折率の法則で記述される。その効果は、反対の光学面からのフレネル多重反射によって増幅される場合がある。高角度でマウントされた厚い検査サンプルでは、適度に正確な透過計測はほぼ不可能になる場合がある(検査サンプルは、一般に小さくフラットなガラス板であり、ガラス板は残りのコンポーネントとともにコーティングされており、検証可能な実例、特殊コーティング実行記録として役立つ)。分光光度計を使って、レンズを通した透過計測は、同じ理由から簡単ではない。

上述の課題は、ディテクタに積分球を追加し、薄い検査サンプルを用い、サンプルからディテクタまでの距離を減らすことで対処できることがある。より大きな積分球は、一般に好結果を生む。光がディテクタに届く前に、積分球内を何度も飛び跳ねて光のアベレージングが行われるからである。積分球には、一般にバッフルが備わっており、これは光のディテクタ直撃をなくし、積分球から逃げる光の割合を減らすためにポート・ウインドウを一段と小さくしている⁽²⁾。

しかし、さらに大きな積分球を使うことには問題がある。小さなビームを使

って計測するとき(小型サンプルや高角度で必要)、ディテクタに届く光が少なくなり、信号対雑音比(SNR)の問題に帰着することになる。市販の計測装置で設定が非常にうまくいくと、平坦で薄いARコートの検査サンプルの最高条件の計測不確かさは垂直入射であり、一般に $\pm 0.1\%T$ の範囲にある。

ポラライザや可変角ディテクタモジュールを市販分光光度計用に購入することは可能である。可変角反射率アクセサリは、反射でのARパフォーマンスの計測で十分に使える。ブルースター角の計測は、角度と偏向における不確かさ評価に使える。設定がよければ、不確かさのこれらの原因は一般に、光度計の誤差の原因と比較して小さい。透過計測における不確かさの根拠を適切に要約するには、以下の式で記述できる⁽³⁾。

$$\mu_{total} = \sqrt{(\mu_s)^2 + (\mu_A)^2 + (\mu_N)^2 + (\mu_p)^2 + (\mu_o)^2 + (\mu_w)^2}$$

不確かさ全体(μ_{total})は、計測再現性(μ_s)、ビームアライメント(μ_A)、縦軸直線性(μ_N)、偏向の不確かさ(μ_p)、入射角不確かさ(μ_o)、および波長の不確かさ(μ_w)の関数である。

ほとんどのARコーティングのスペクトルパフォーマンス評価に対する提案されたアプローチは、仕様の完全な角度範囲での反射計測、垂直入射で損失を評価するための透過計測を行うことである。重要なアプリケーションでは、レンズを購入する際に、システム設計者が、高角度での全範囲のデータ、または理論データを受け取るかどうかを認識していることが重要である。

分光光度計ベースの反射計測

光源やディテクタ配置に物理的な制約条件があるので、サンプルを反射計

測できるおおよその最小角度は、常にある(一般には 10° 以下)。ほとんどの光学コーティングでは、入射角 $0 \sim 10^\circ$ でパフォーマンスの差は重要でない。

分光光度計を使った高反射面の正確な測定は、上述のAR透過計測と多くの同じ理由のために、簡単ではない。基準と計測との間で、ディテクタで計測された信号のわずかな変化が、計測されたパフォーマンスにおいて重大な誤りを引き起こす。基準計測で使用したパスを変更することなく、テストサンプルを計測パスに挿入することは、反射計測では常に用心しなければならない。

加えて、反射率標準に関連した課題もある。理想的には、基準計測にはトレーサブルな校正済みのミラーを使用する。時間の経過とともにこうした基準ミラーが劣化することは考慮されなければならない。これは、金属酸化物あるいは機械的劣化のためである。高反射器計測における不確かさ全体は、透過式1.1に説明されている全条件に依存する。とは言え、ミラーの計測では、縦座標(μ_N)の不確かさは、基準の反射性における不確かさにかなりの程度影響される。市販の分光計の一般的な計測ステージは、約 $\pm 0.5\%R$ の不確かさで光反射鏡を計測できるが、注意深くアライメントされ、校正された市販の分光光度計に精密反射率付属品をつけると、約 $\pm 0.05\%R$ の不確かさで計測することができる。

円錐角

分光光度計は、一般にテストビームに関連して多少の円錐角を持つ。光学アプリケーションにとって最良の分光光度計は、コリメートが優れており、高いf値を持つシステムである。計測システムの円錐角の効果を理解すること

は、ポラライザや精密フィルタなどのコーティングには特に重要である。フィルタ、あるいはポラライザエッジの配置は、コリメートがよくないテストビームを使うと、大きく傾くことがある。非コリメートシステムのビームアパチャを切り取ることは役に立つが、SNR低下というトレードオフがある。

また、高精密フィルタでは、グレーティングやスリット幅によって決まる信号帯域は制限される。高精密フィルタやポラライザの最良の計測は一般に、特注の(コリメートされた)分光光度計、あるいはレーザベースの測定システムで実現される。市販の分光光度計は一般に、 $2 \sim 3^\circ$ の半円錐角となっている。円錐角がコーティングパフォーマンスに対して与える効果の例は、図2で見ることができる。

検査サンプル

上述のすべての考察は重要である。とは言え、たとえ全てが完璧にできたとしても、検査サンプルが光学パフォーマンスの代表でなければ、データは価値がない。ほとんどの場合、光学製品から直接正確な計測を得ることは非常に難しいので、検査サンプルを利用することが必要になる。ARコーティングでは、検査サンプルの屈折率および分散が光学製品の指標と厳密に一致(あるいは正確に一致)していることが極めて重要である。

コーティングパフォーマンスを正確に計測するには、多くの場合、コーティングハウスが基板の光学特性全域をカバーする検査サンプルの在庫を大量に持っていることが必要になる。検査サンプルの配置も極めて重要である。検査サンプルは、コーティングチャンバ内の高さや角度の両方に適合するように配置されなければならない。カー

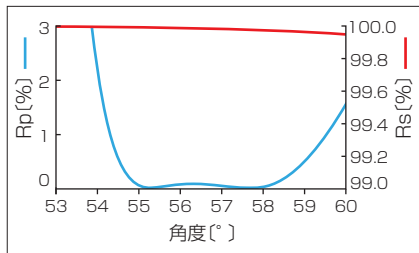


図2 1064nmブルースター角(56.6°)薄膜ポラライザのパフォーマンスを、入射角の関数として示している。分光光度計テストビームの2~3°半円錐角は、p偏向(青線)パスバンド透過の計測されたパフォーマンスに大きな影響を与えている。光学システムで非コリメート光を用いると、p偏向光の漏れが妥当性の問題となりうることは留意に値する。p偏向光は、ポラライザから漏れる。これは、円錐頂点の照射角の平方に対して光が傾いているからである。

ブが大きな表面、あるいは急峻な表面では、開口部の外側エッジに第2の検査サンプルが必要になることがある。光学コーティングの均一性は、半径方向距離、高さ、表面角度の関数として、チャンバ内で変化する。図3は、コーティングパフォーマンスに対する修正されていない非均一性の影響を示す一例である。

レーザーベースの計測技術

反射性、透過、損失の最高精度計測では、レーザーベースの計測技術が必要となる。デュアルビームのレーザーベース反射測定器(LR)は、反射と透過の広い角度範囲で極めて正確に、精密に計測できる。設計が優れていれば、こうした測定器はビームの安定性、テストビーム形状で大きな利点があり、コリメートされた光源のすべての利点を有している。よくできたLRは、平坦な検査サンプルで測定された場合、ミラーや高透過表面では計測不確かさが $\pm 0.01 \sim \pm 0.05\%$ となることがある^{(4)~(6)}。

レーザーベースのキャビティリングダウン計測システムは、光損失(吸収+

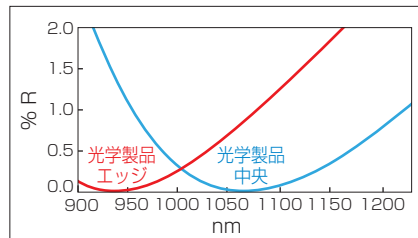


図3 150mm曲率半径凸レンズ、0°で修正されていない1064nm VコートARのパフォーマンスがプロットされている。光学製品(青線)の中央では、ARは正しく1064nmに中心がある。中心から半径方向に50mmの位置では、コーティングは12%薄く、開口部エッジでは反射率が、実に1%以下になっている。このプロットは、見通し線コーティングプロセスを使って一般的な無修正のパフォーマンスを表現することを目的としている。

散乱)あるいは非常に高感度の反射性計測に使える。このようなシステムは、2つの高反射ミラーで形成された光学キャビティからの漏れ光の強度変化を計測する。透過サンプルをキャビティ内に置き、光がサンプルに吸収または散乱されるにしたがいリークダウンタイムの変化を使ってサンプル内の損失を100万分の1のオーダーの分解能で計算できる。

損失も分光光度計またはレーザー反射計を使って低精度で測定できる。ここでは、計測された%Tを(100%計測された%R)から減算する。分光光度計を使う損失測定の正確さは一般に、前に議論したように、透過測定の正確さに制限される。ミラーの反射の高精度計測も、キャビティリングダウンを用いて、テストサンプルをキャビティ内に置くことで行える。この技術は、レーザーミラーの反射性計測で使用されることがよくある。おおよそ99.95%の反射性が必要とされる場合である。

コーティング誘起形状変化

光学コーティングは、たとえ非常に薄くても、コーティングした光学製品の表面に大きな力を与えるに十分な内

部応力を持つ。コーティング応力が強すぎると、光学製品の形のゆがみ、コーティングそのものの機械的破損につながる。

両側にARコーティングしたレンズやウインドウでは、コーティングが表面形状に与える歪みの影響は非常に小さい。これは、このようなコーティングによる力が等しく、効果を相殺しているからである。しかし形状のゆがみは、誘電体ミラー、ポラライザ、フィルタなど、比較的厚いコーティングには大きな課題となることがある。

応力を測定する効果的な方法は、薄くて円いウエハにコーティングを堆積することである。続いて、コーティング後のウエハの曲がり具合を計測し、次に応力を逆算する。コーティング応力に大きく寄与するのは、事実上熱機械であり、これは光学部品とコーティング材料との間で、上昇した加工温度と熱膨張のミスマッチに起因するものである。コーティング応力を正しく計測するには多くの場合、熱膨張係数が光学部品の熱膨張係数と同じウエハを使う必要がある。ストーニーの式は、ウエハの曲率半径の変化から、コーティングの応力計算に使用できる。

$$\sigma_f = \frac{E_s \cdot t_s \cdot 2}{6(1-\nu_s)t_f} \left(\frac{1}{R} \right)$$

ここでは E_s =基板の弾性率、 ν_s =基板のポワソン比、 t_s =基板の厚さ、 R =曲率半径、 σ_f =膜の応力。

ストーニー(Stoney)の近似値は、膜の機械特性が無視できるような基板と比較して、膜の厚さが十分に小さいことを仮定している。膜そのものの剛性、つまり曲げ耐性が無視される。これは式に膜の弾性係数の項が欠如していることから分かる。この近似値の精度は、膜の厚さと膜の硬さが増すにしたがい、崩壊し始める。フロイト(Freud)

とブレッシュ (Suresh) は、そのテーマについての書籍でストーニー近似値の限界を説明している⁽⁷⁾。

彼らのアプローチを使い、ウエハサイズを慎重に選択すると、ほとんどの光学コーティングで、5%以下の計測された応力において計算された不確かさが可能になると推定している。以下は、コーティング後の表面変形に関連して留意すべき重要な点である。

1. 円い面 (R面) を持つ光学部品や平坦で平行な面を持つ光学部品では、コーティング応力誘起のたわみは、ほとんど全部が力の形をとる (半径変化)。この形状の光学部品では、ストーニーの式を使ってコーティング後の形状変化を予測することは簡単である。より複雑な形状は、有限要素解析を使うことでモデル化に成功する。
2. たわみは、膜の厚さ (t_f)、および基板の厚さ (t_s) の平方とともに直線的に拡大することに注意することは重要である。大きな直径の薄い光学部品や厚いコーティングでは、コーティング応力誘起のたわみが大きくなる。
3. 低い歪点の光学ガラスは、上昇したコーティング温度で、時として形状が可塑的に変化することが観察されている。この形状変化はコーティング応力誘起ではなく、ガラスそのものの変化に関連している。このような光学ガラスで、形状を厳しくコントロールするには、低温コーティングプロセスが必要になる。

コーティング後の形状変化の計測

コーティング後の形状と精密光学部品の表面粗さを正確に計測することは簡単ではない。ほとんどの光学部品業者は、形状誤差や表面粗さは位相シフト干渉計で計測する。位相シフト干渉計は、リファレンス (基準) とテスト面の間

の距離を変調しながら反射位相情報を収集する。テストする光学面全体にわたって収集された位相情報は、表面高さの変化を計算するために使用される。

光学コーティングは、光の建設的干渉と相殺的干渉を利用する。その光は、所望のスペクトルパフォーマンスを達成するために、光学部品表面に形成した一連の膜からくる。光学部品表面には、高屈折率と高屈折率の膜が交互に形成されている。干渉計を使って干渉コーティングの表面をテストすると、間違った結果、実際の表面形状あるいは表面粗さを表していない結果が得られることがある⁽⁸⁾、⁽⁹⁾。これの例外は、単一波長で使用するためにコーティングした表面の波面を、同じ波長で動作するレーザ干渉計を使って計測する場合である。干渉コーティングからの反射位相は、コーティングの厚さ、あるいは屈折率ですぐに変わることがある。他の方法では、これはスペクトル的にあまり重要でない変化である。コーティングの不均一は、すべてのコーティングプロセスで、ある程度は起こる。これはすでに述べたとおりであるが、曲がり急な表面では特に問題になることがある。

図4と5に挙げた例は、ヘリウム・ネオンレーザ干渉計 (632.8nm 波長) で計測したコーティング後の波面に対する、広帯域誘電体ミラー (BBHR) の影響を示している。光学部品は、大きな溶融シリカ凸面鏡。表面のコーティング均一性は、<0.5%に修正されていた。コーティング応力は中間レベル付近に調整され、モデリングはコーティングによる光学部品の物理歪が重要でないことを予測していた。溶融シリカには、コーティングプロセス温度で高い寸法安定性があることが知られている。コーティング後、顧客はBBHRで表面形状を計測

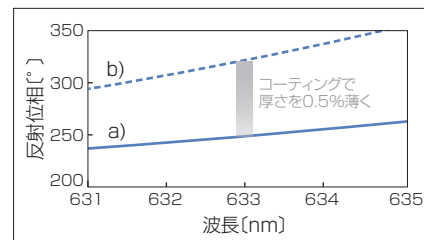


図4 (a)可視広帯域誘電体ミラーコーティングと(b)同じコーティングで厚さを0.5%薄くしたものの反射位相との比較を示している。コーティングの厚さの変化は、光学パフォーマンスには重大な影響を与えないが、632.8nm干渉計で計測すると反射位相は70°の変化で現れる。

することを要求した。反射波面における著しい変化は、コーティング後、632.8nm干渉計で計測された。計測されたコーティング後形状の明らかな変化の原因は反射位相効果であり、これは光学部品を薄いアルミコーティングでフラッシュコーティングし、同じ波長で再計測することによって確認された。実際、光学部品の表面形状はコーティング中には大きく変わってはいなかった。

干渉コーティングが表面形状あるいは表面粗さを変える程度を計る目的で、以下のアプローチを用いると成功した。

1. コーティング応力を計測し、コーティングがコーティング後の形状に与える影響をモデル化する。うまくいけば、このアプローチは効果的になり得る。
2. 薄い金属膜を誘電体多層コーティング上面にフラッシュコーティングして反射の位相効果を除去する。金属コーティングは、テスト後にはがすことができる。このアプローチは、アプリケーション (例えば、高エネルギーレーザ、UV) によっては適切ではない。
3. コーティング前に、コーティングしていない裏面を計測し、コーティング後に形状変化をテストする。このアプ

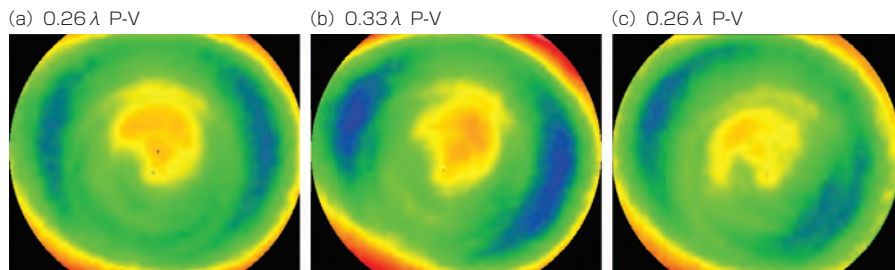


図5 溶融シリカミラーの形状(山から谷まで)は、632.8nm干渉計で計測している。コーティング以前(a)、多層広帯域誘電体ミラーを適用した後(b)、広帯域誘電体ミラーにアルミをフラッシュコーティングした後(c)。画像はすべて同じスケール。ミラー形状および計測されたコーティング応力に基づいた、コーティング後の著しい形状変化は予期されなかった。(b)の形状変化は、ミラーの中央から縁までの位相変化の結果。これはコーティング厚の変化および誘電体ミラーにおける光学干渉効果によるものである。

ローチは効果的であるが、裏面の研磨とテストに余分なコストがかかる。

4. コーティング後の表面粗さを干渉計の代わりに原子間力顕微鏡 (AFM) を使って評価する。表面粗さ計測の成功事例ごとに、計測技術を変更するときにはいつでも空間周期的フィルタリングに細心の注意を払わなければならない。また、より標準的な20倍干渉計テスト(視野 $350 \times 450 \mu\text{m}$)に対して、小型AFM(視野 $10 \sim 100 \mu\text{m}$)を用いると、RMS計算の結果として、RMS表面粗さ計測が著しく低くなる場合があることに注意^{(10), (11)}。

極めて高品質のイメージングシステムおよび干渉計システムでは、位相の変化、特に反射コーティングからの位相変化は性能上の問題となることがある。波長が何であっても波面は、コーティングによって引き起こされる表面形状と位相変化の両方の関数であるからである。そのようなアプリケーションでは、コーティングの不均一を最小化することを考慮すべきである。コーティングデザインでは、波長による位相の急激な変化は危険信号である。前に指摘したように、使用する波長以外で、コーティングした表面からの波面の計測は何であろうと代表的な結果ではありえない。アプリケーションが波面の

精密制御を要求するときは、利用を考えている条件と正確に同じスペクトル条件で、コーティングした光学部品をテストすることが理想的である(ただし、財務的にいつも可能とは限らない)。

結論

光学部品を調達するときは、コーティングのスペクトルパフォーマンスがどのように計測されているかを尋ねることが重要である。高反射物を計測する

際に、ベンダーがARコーティングの損失と正確さをどのように評価するかを尋ね、コーティングベンダーが、同等の屈折率を持つ検査サンプルを使っており、検査サンプルの設置がコーティングされる表面を代表していることを確認すべきである。形状(位相ではない)を計測しなければならないアプリケーションでは、使用波長で計測が行われるのであれば、コーティング後の干渉計計測についての質問は避けるべきだ。反射防止 (AR) 膜では、表面形状に対するコーティング応力の正味の影響は非常に小さい。誘電体ミラーやフィルタのコーティングの形状に対する影響は大きくなることもある。こうした場合、コーティングプロセスや結果としてのコーティング応力の理解は重要である。総合的に最優良のシステムパフォーマンスを得るために、見積もりに先立ってシステムエンジニアと、システム要件と製造トレードオフを話し合うことを勧める。

参考文献

- (1) A. Reule, Appl. Opt., 7, 6, 1023-1028(1968).
- (2) J. Taylor, "Integrating sphere functionality: The scatter transmission measurement," PerkinElmer technical note(2013); see <http://bit.ly/1IN8xsS>.
- (3) T. Germer et al., Spectrophotometry: Accurate measurement of optical properties of materials, Academic Press, Amsterdam, Netherlands(2014).
- (4) A. Voss, Appl. Opt., 33, 36, 8370-8374(1994).
- (5) S. Holler, Fordham University, correspondence(Jun. 11, 2015).
- (6) C. Smith, University of Rochester, correspondence(May 26, 2015).
- (7) L. Freund and S. Suresh, Thin film materials: Stress, defect formation and surface evolution, Cambridge University Press, Cambridge, England(2003).
- (8) D. Savage and J. Watson, "The effect of phase distortion on interferometric measurements of thin film coated optical surfaces," Optimax Systems Inc. white paper(2010); <http://bit.ly/1UVj16K>.
- (9) P. Baumeister, Optical coating technology, SPIE—The International Society for Optical Engineering, Bellingham, WA(2004).
- (10) D. Aikens, "Meaningful surface roughness and quality tolerances," Proc. SPIE, 7652, International Optical Design Conference(2010).
- (11) J. Bennett and L. Mattson, Introduction to surface roughness and scattering, Optical Society of America, Washington, DC(1989).

著者紹介

ピート・クピンスキは米オブティマックス・システムズ社(Optimax Systems)の光学コーティンググループリーダー。e-mail: pkupinski@optimaxsi.com URL: www.optimaxsi.com
 アンガス・マクレオドは米シンフィルムセンター社(Thin Film Center Inc)社長であり、アリゾナ大光学サイエンス名誉教授。e-mail: angus@thinfilmcenter.com