

製造工程の進歩によって決まる 光学コーティング設計の進歩

アンガス・マックロード

光学コーティング設計用のソフトウェアツールは、コーティング設計者のツール一式の中でも不可欠なアイテムになった。最近は、光学性能の直接計算や最適化の域をはるかに越え、生産計画や製造工程シミュレーションにおいてさえもソフトウェアツールが使用されている。

光学コーティングの設計技術の開発は常にコーティング製造のニーズと能力に大いに応えてきた。コーティング設計は本質的に現場の技術であり、製造できないコーティングを設計することはあり得ない。進歩を阻んできた主な要因は、材料パラメータの測定精度ならびに蒸着プロセスと蒸着直後の材料そのものの安定性であった。

もちろん、いかなる設計ツールにおいても、第1に重要なことは良好で信頼できる性能モデルだ。1940年代後半、フローリン・アベレス氏(Florin Abelès)は、彼の博士論文で、光学薄膜コーティングの設計と計算のための行列法を発表した。これは現在でもわれわれが利用しているものであり、60年以上にわたって繰返しその有用性が実証されてきた。今日では、市販のワープロ機能が作家にとって必需品であるように、市販のコーティング設計ソフトウェアはコーティング設計者にとって必需品だ。新しい設計ツールは、かなり使いやすくなったが、元になっている基礎理論は同じである。使いやすさ、正確な結果の迅速な送出、産業界のニーズの絶え間ない発展が、新たに改善されたツールに対してさらなる需要を生む。

光学コーティング設計ソフトウェアは、静的製品とは言い難いものだ。

2000年のドットコム・バブルの崩壊は多くの分野にとって悲劇的な大惨事であった。しかし、光学コーティングの分野では、これは経済的には惨事であったが、技術的なものではなかった。必要な薄膜部品に課せられた厳しい要求が、産業のほぼすべての局面に迅速かつ著しい進歩を促した。イオンアシスト蒸着やスパッタリングなどの強力な工程がコーティング製造を一変させた。水分によって起きる不安定性はもはや問題ではなくなった。かつてない精度と安定性を持つ数百層のコーティングが大量に施されるようになった。通信市場の縮小は手痛いものだったが、関係者からの信頼は段階関数的に増加し、設計ソフトウェアへの新たな需要も生まれて、結果的には新しい技術をより広範囲な光学コーティング業界へと拡散されることになった。

実行シート

光学コーティングは、常に、耐環境性を強化し、正確な光学特性を保証すると期待されている。したがって、その本質を排除することは難しい。蒸着は、一般に光学部品に対して実施される最終工程であり、その段階で発生した不具合はいくつもの重大な結果をもたらす。製造プロセスの保証に関しては、常に強い関心が寄せられている。プロセス精度と要求される設計公差が鍵となる要因だ。材料の光学定数の再現性は強力なプロセスによって大幅に改善されたが、正確な層厚の確保は、いまだに制御系の全ての局面に直接関係している。複数のテストランは高価になる。こうした場合、最新の設計ソフトウェアによる支援が生きる。

コーティング設計は、材料と厚みによってそれぞれ定義されるいくつかの層から構成される。製造プロセスにおいて厚みを直接測定することは不可能

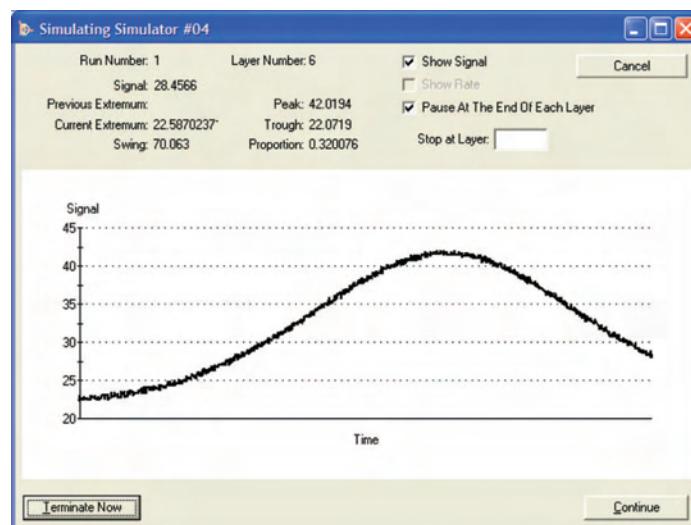


図1 単純なプロセスシミュレーションの例では、光学モニタリング信号の雑音が40層のロングパスフィルタ用の実行シートテスト中にシミュレーションされている。(資料提供:シン・フィルム・センター社)

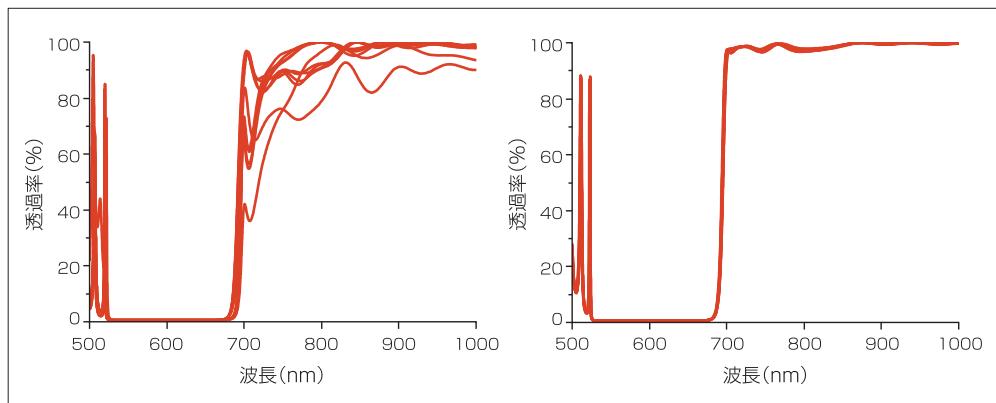


図2 同一の40層のロングパスフィルタに対して、それぞれ8層を含む5個のモニタリングチップと530nmのモニタリング波長をシミュレータへの入力として使用した。図1からの雑音結果を用いて10回の別個に実行した結果は受け入れ難いものであった(左)。モニタ波長を単純に510nmに変更すると、実行シートの問題点が解決した。雑音レベルを変えずにシミュレータで10回実行したところ、今度は、申し分ない性能を示した(右)。

(資料提供:シン・フィルム・センター社)

だが、単純なクロックから複雑な光学系または正確なマイクロバランスまでの、いずれかのセンサの出力から推定できる。どのセンサを使ったとしても、センサの出力と層厚との関係が最も重要である。コーティング設計ソフトウェアは自ずと「実行シート」、すなわち層の終端において期待されている信号に関するコントローラへの一連の命令シート作成へと拡張される。実行シートが正確に履行されれば、正確なコーティングが得られるはずだ。しかし、問題は残る。満足できる歩留まりを得るにはどの程度正確に実行シートに従わねばならないのだろうか。言い換えれば、必要な公差はどれほどなのか。

モンテカルロモデル

光学コーティングにおける公差の研究は長い歴史を持つ。解析モデルからスタートしたが、その時点では、実際の層厚誤差がどの程度になるかといったことは考慮されていなかった。扱いを容易にするために、通常、解析モデルは一次効果に限定されるが、このことは誤差が非常に小さいか、通常よりはかなり小さいことが前提とされている。その後、より現実的な誤差を組込むことが可能なモンテカルロモデルが出現した。

最初のモンテカルロモデルはまったく単純で、層厚の誤差は所定の統計的

性質の無限母集団から抽出され、一つの層の誤差は他の層の誤差に無関係であると仮定されていた。これでも大幅な進歩であったが、狭帯域フィルタなどの特別なコーティングについての予測で、そのようなコーティングが実際に作製されたとしても、そのようなフィルタの製造は不可能であることが示唆された。その結果、モニタリングシステムの詳細と誤差の相互作用を考慮した、より現実的なモンテカルロモデルが生まれた。誤差は、相互に影響しあうだけではなく、一定の状況の下では相互に補償し合うことさえあることが明らかになった。コーティング設計と制御技術が密接に関連していることも明瞭になった。

設計ソフトウェアにおける最近の進歩は、テスト実行数を減らし、生産歩留まりを改善することを目的にして、全プロセスの重要な詳細がすべてモデル化されたことである。この技術は「コンピュータ製造」と呼ばれることがある。最新の典型的なコーティング設計ソフトウェアパッケージは、設計ツールに加えて、実行シート発生器とプロセスシミュレータを含む(図1)。実行シートは、設計が完結する前にシミュレーション機能を使ってテストされ、合格製品の希望歩留まりを保証するよう、大抵はその設計に沿って、さら

に修正されることになる(図2)。

将来はどうなるのか？光学コーティングは光学分野全体に役立っているため、新しいツールと設備を必要とする薄膜設計業界全体からの新しいニーズが絶え間ない状態が続くだろう。光学コーティングは単純な光学以外の特性も持っていることも、これに加えて考慮しなければならない。コーティングの光学特性は温度によって変化する。それらは、歪エネルギーを含み、巨大な張力または圧縮レベルに達することさえある。また、環境外乱、特に、摩耗、熱、湿度に対して抵抗を持つことも期待されている。光学性能はすでに優れたモデルが存在するため、分かりやすい。今では、基板の重要な役割を明らかにする可逆的な熱誘起シフトの優れたモデルが存在する。われわれは応力に関するいくつかの可逆的な熱モデルを持っているが、応力が顕著なヒステリシスを示すことがあり、時間にも依存することがわかっている。耐摩耗性については、今のところ、われわれの理解の域を超えている。われわれにできることは、適度な抵抗を持つことが知られている材料を使用するだけだ。

著者紹介

アンガス・マックロード(Angus MacLao)はシン・フィルム・センター社(Thin Film Center)の社長。e-mail: angus@thinfilmcenter.com