

OptiReOpt

OptiReOpt は一連の *OptiLayer* ソフトに加わる新しいモジュールで、光学モニタを備えた成膜装置による多層膜蒸着の実時間制御のためのソフトです。自動蒸着用アプリケーションソフトと *OptiReOpt* を組み合わせることにより多層膜蒸着の膜厚監視データから蒸着済みの膜厚誤差を高速で計算し、残りの層の膜厚を再最適化することができるソフトです。

適応 OS

Windows 2000 (Service Pack 3 以上) または Windows XP (Service Pack 1 以上)

注) Windows 98 や Windows ME は制御が不安定になります。

概要

OptiReOpt は *OptiLayer* ソフト(*OptiLayer*, *OptiChar*, *OptiRE*) とは全く異なるプログラムで、標準的な *OptiLayer* のインタフェイスではなく DLL(Dynamic Link Library) として実装されています。下記に適応可能なソフトの例を列記します。

- Microsoft Visual Studio version 6.0 (C++, Visual Basic)
- Microsoft Visual Studio .NET (C++)
- Borland C++ Builder (any version)
- Borland Delphi (version 2.0 and higher)
- LabVIEW version 5.X and 6.X

光量変化によって膜厚制御する制御ソフトが DLL を実装していれば、全ての成膜装置に *OptiReOpt* を組み込むことができます。たとえば *OptiReOpt* と LabVIEW とをリンクすると有効です。

特徴

OptiReOpt は計算速度が極めて速いので、成膜プロセスを中断せずに直ちに成膜終了した層のパラメータを算出し、あらためてターゲットに近づけるよう残りの層のパラメータを短時間で修正計算します。

OptiReOpt DLL は二つの部分で構成されます。ひとつは、成膜済み層のパラメータの計算、もう一つは、この後成膜する層の再最適化計算で、いずれもオンライン(実時間)で行います。たとえば、すでに蒸着済みの層の膜厚を計算して途中の層の膜厚誤差が大きいとわかった場合、残りの層で再度最適化して最終性能が改善されるようにすることができます。

最新のコンピュータが備えている全ての性能、すなわちマルチ CPU による並行計算システムやハイパースレディングの CPU システムに合わせて最適化するので、DLL を利用する計算速度が非常に速くなります。計算時間は層数と、取り込む分光データのポイント数によって変わりますが、成膜済み層のパラメータの計算時間は通常数秒以下、あとの層の最適化はそれ以下の時間で十分です。

オンライン膜特性計算

蒸着済みの層の膜厚特性をオンラインで計算するためには各層の蒸着が終わると同時に分光透過率／反射率を測定します。*OptiReOpt DLL* は膜厚特性の監視に利用され、蒸着の途中、短時間で分光器の波長を走査して透過率/反射率を測定することにより膜厚が精度よく求めることができます。

特性計算ルーティンには二つのモード; SEQUENTIAL および TRIANGLE があります。SEQUENTIAL モードの場合は最後の層の膜厚だけを計算するルーティンであり、一方、TRIANGLE モードでは、蒸

OptiReOpt

着済み全ての層の膜厚を決めるルーティンで、当然前者の方が後者より計算が早くなります。もちろん、TRIANGLE モードの方が蒸着済みの膜厚計算値の信頼性は向上しますが、成膜プロセスが非常に安定で、かつ、測定データを高精度で取込めるなら SEQUENTIAL モードを選択することもあります。

オンライン再最適化

オンラインの再最適化とは、蒸着済みの層特性をオンラインで計算し膜厚誤差を補正することです。再最適化が成功する鍵は、膜特性計算が高精度で行われるかどうかにかかっています。

OptiReOpt の再最適化ルーティンはすでに成膜終了した膜厚誤差を考慮して理論的目標値に最も近づくように残りの層の膜厚を再設計する作業です。もし、何らかの理由で理論的な目標値が使えない場合は、初期設計で計算した透過率/反射率を目標値として設計補正を行うこととなります。

実測データ

既に述べたように膜特性計算の信憑性やオンライン再最適化が成功するかどうかは実測データの精度が高いかどうかで決まります。すべての分光測定器は校正値が時間と共にドリフトするので、あらゆる方法を使ってこれを回避し、あるいは最小に押さえなければなりません。実際には測定スキャンごとに装置の校正を行うことが望ましいとされます。

測定は透過率/反射率データとして最も信頼できる波長範囲でおこないます。そのためには使用している分光モニタの短波長と長波長の切り替え波長域は特に入念に調べておかなければなりません。

OptiReOpt DLL は計算速度が速いので、データのポイント数の制限をおく必要はありませんが、可視域であれば、取り込むデータは通常 1~2 nm ステップで十分です。

実際にはどんなに用心しても測定のドリフトが発生することがあります。*OptiReOpt* はこのような場合データの系統的な誤差(systematic error)を自動的に補正するアルゴリズムを内蔵しています。誤差のひとつはある値で一連のデータがシフトすること、もう一つは縦軸の校正が不正確なために生ずるという2種類の誤差があり、*OptiReOpt* はこれらを区別しています。前者の補正には”data shift correction”を、後者には”scale adjustment”を用います。

真空中と大気中の膜材料屈折率

OptiReOpt DLL は多層膜蒸着をサポートするためのソフトです。典型的な例として高屈折率(H)、低屈折率(L)の二種類の膜材料が使われます。

成膜方法によっては大気に露出すると膜材料の屈折率が変動することがあります。この変動は主として膜が多孔質であるためですが、これ以外でもわずかな化学的あるいは構造的な変化により屈折率が変動することがあります。オンラインモニタおよび、オンライン特性計算は真空環境で行うのに対して、実際使用する膜はこれとは全く異なる環境で使用するという念頭をおこなう必要があります。実際の膜は蒸着方式や蒸着条件によって異なるので、文献上の屈折率を鵜呑みにすることは危険です。オンライン特性計算および再最適化が成功するためには、真空中および大気中(あるいは膜が実際に使われる環境)における膜材料屈折率をよく知っていることが重要です。

さらに膜材料の屈折率だけでなくバルクの不均質性についても調べておく必要があります。エネルギー蒸着による充填率が高い膜は不均質性(一般に正の不均質性)を示すことがあります。不均質性を無視すると、オンライン膜特性計算の過程で誤差が蓄積し、層を重ねるごとに膜厚精度が損なわれることになります。真空中および大気中での膜特性計算には、OptiChar と OptiRE を使用すると便利です。

補正係数

蒸着後、大気中に露出すると屈折率だけではなく、膜厚も変化することがあります。大気中と真空中の屈折率の比は補正係数 (correction factor) と呼び、これは蒸着材料毎に異なり、成膜方法など多くのパラメータにも依存するので、あらかじめ単層膜について真空中と大気中で変わらないかどうかを比較検討しておかなければなりません。OptiChar はこれを調べるのにとりわけ適しており、膜材料によっては補正係数が 1 にならないことを確かめ、予めこの数値を入力しておきます。

補正係数 (correction factor) を知っておくと、モニタガラスを使って膜厚制御を行う間接モニタ方式でも有効です。この場合の補正係数はモニタガラスの膜厚とワークの膜厚の比を指します。この方式でも大気露出後膜厚が変化するときは、充填率と不均質性を考慮する必要があります。

真空および大気中の膜設計および特性

実際の測定とオンライン特性計算は、真空中の情報に基づいていますが、オンラインで再最適化するのは大気中の分光目標値に合うように設計しなければなりません。真空中および大気中の膜材料の屈折率および、材料補正係数が分っていれば、真空中／大気中に対応した設計や特性を関連づけることができます。

設計補正の基準

オンライン再最適化はオンライン膜物性計算結果に基づいて行われますが、多層膜構成のフィルタの場合、これは非常に複雑な問題です。数学的な観点からいうとオンライン膜物性計算問題はいわば逆認識問題に属するものであり、特有の性質があります。その一つは、逆問題解決過程で不確かさがあると答えがどんどん不正確になるという性質です。OptiLayer ソフトの数学的ルーティンではこのような答えの不安定性を最小化する最新理論を備えていますが、それでもオンライン特性計算問題の性質上、常に潜在的な危険を伴います。

オンライン膜特性計算は測定データの誤差によって深刻な影響を受けるので、分光測定では最高精度を得るためにあらゆる手段を尽くさなければなりません。しかし、たとえ測定データの精度が高くてもあまり頻繁に設計修正を繰り返すと急激に解が不安定になるので、何処まで設計修正するかはいくつかの実施例に基づいて注意深く行わなければなりません。

まず第一に、膜厚誤差が十分小さいときはむしろ設計修正をしない方がよいことがあります。つまり、膜厚誤差がある水準を超えない場合は誤差を無視するように誤差閾値を定義しておいた方が良好な結果が得られます。ただし、全ての設計に共通の誤差閾値を決めるのは不可能なので、それぞれ目的にあった誤差レベルを決めます。そのためには OptiLayer ソフトに含まれる Analysis オプションを利用することをお勧めします。

OptiReOpt の再最適化をしてもメリット関数が目立って改善されない場合があります。このようなときオンライン特性計算や再最適化の不安定性が増すので、設計修正を行わない方がよいのです。あらかじめメリット関数の改善しきい値を定め、再最適化後もこの値より小さくならなければ理論設計を変えないでおくようにします。