

分光エリプソメータを用いた
光学薄膜蒸着のリアルタイム制御

Bernard Drévilion, Pavel Bulkin

要旨

in-situ分光エリプソメータは、高感度で非侵襲性の薄膜成長リアルタイム・モニタとして優れた機能を持っている。従来、多層膜干渉フィルタは、薄膜の屈折率が1つの層内では一定に保たれるとの仮定の下で設計されてきた。しかし、最近のように複雑な構造を持った多層膜では、各層内での屈折率のわずかな変動がフィルタの光学特性に大きく影響を及ぼすことが少なくない。そこで、屈折率と成長速度の両方をリアルタイムに把握することが大変重要となっている。本稿では、薄膜成長プロセスにおけるいくつかの異なる制御方法を議論し、プラズマ活性化学気相成長法(PECVD)による多層膜形成のin-situモニタリングへの応用例を紹介する。ダイレクト数値転換アルゴリズムと最小二乗フィッティング法を使って屈折率と膜厚を求める方法は、1/4波長光学フィルタと不均一な屈折率分布を持つ薄膜に対して適用し、高い効率と強い信頼性が証明された。

1 はじめに

近年、多層膜の構造が複雑になるに従い薄膜作成不良による費用ロスが大きくなり、薄膜作成プロセスをリアルタイムに監視、制御するin-situプロセスモニタが求められている。

従来の透過光式や反射光式の光学式膜厚モニタは、水晶振動子型のモニタと同じく非常に有効な計測手法ではあるが、複雑な構造を持った多層膜のプロセスに対しては十分ではない。最近では、透明基板だけでなく、あらゆる材料の解析が必要になっている。また、蒸着チャンバに斜めに入射できるポートしかない場合や、蒸着材料の屈折率が不明確なプラズマ活性化学気相成長法(PECVD)を使って蒸着するなどプロセスにも新たな問題が発生している。

位相感度が高いin-situ分光エリプソメータは、多層膜や屈折率変動するような膜の蒸着プロセスの監視・制御用として最も強力な計測手段として提案されている^{[1]-[4]}。エリプソメータのもう一つの大きな長所は、光源の強度の変動によって測定精度が左右されない点である。屈折率や膜厚があらかじめすべてわかっているもの、特に、無定形材料の表面をエッチングするような場合にはエリプソメータを使えば簡単に正確な計測・制御ができる^[5]。

近年、エピタキシャル成長法を応用した電子デバイス用薄膜(特に、III-V化合物)の研究が盛んで、エリプソメータによるプロセス制御が最も進んだ技術として注目されている^[6]。しかし、光学用薄膜の分野はエリプソメータが最も適用しやすい分野であるにもかかわらず、研究があまり進んでいない。

本稿では、ジョバンイボン社(JY)が開発した光学薄膜用の各種制御アルゴリズム及び方法をまとめて紹介する。

2 プラズマ・チャンバと制御システム

電子サイクロトロン共鳴効果(ECR)により発生させた高密度プラズマ・チャンバを用いて実験した。この装置は分布型ECRを進化させたもので^{[5]-[8]}、マトリックス分布式電子サイクロトロン共鳴プラズマシステム(MDECR: Matrix Distributed Electron Cyclotron Resonance plasma system)と呼ばれている^[9]。

MDECRシステムは、プラズマ・チャンバ、マイクロウエーブ源、排気系、ガス供給系、及び制御システムから構成されている(図1)。ステンレススチール製のチャンバに、光学系用及び診断用のポートと、可動式基板ホルダ(40 mm × 40 mm)が取り付けられている。コンピュータ制御のマスフローコントローラ(MFC)を取り付けた8本のガス供給系が搭載されており、アルゴン、酸素、窒素ガ

すが、プラズマの最も強力な領域の後ろのグリッドを通して供給される。一方、シランガスは基板の前面から注入される。

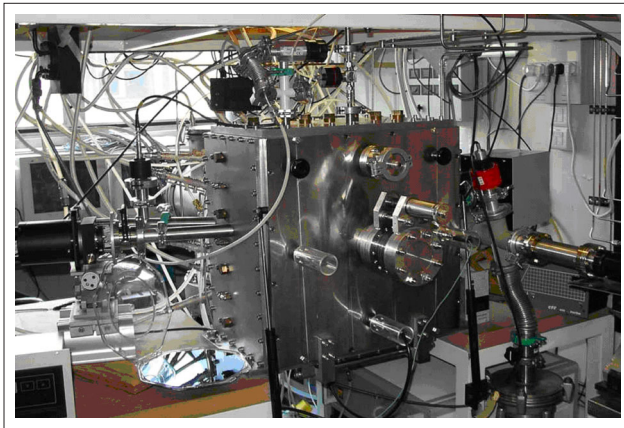


図1 JY製in-situ分光エリプソメータ UVISELを搭載した、MDEC-PECVD蒸着チャンバ (前面の搬入ドアから見た図)

JY製の位相変調型分光エリプソメータUVISELは、MDECシステムに73.4°の角度で取り付けられている。このエリプソメータは、1.5～5 eV (827～248 nm)のエネルギー範囲を分光測定でき、同時に32個の波長(1.45～5.5 eV)で反応速度(厚さ)を測定することも可能である。

マルチチャンネル・データ収集ユニットにより、計測データを200 ms間隔で収集する。本システムはTCP/IP方式でPCに接続されており、JY独自のソフトウェアでデータ処理、パラメータ調整、成長制御などができる。また、シーメンス社製のPROFIBUSを介して、真空、マイクロウェーブ、ガス流量の管理を行うこともできる。このようなタスクシェアリング機能により、更に複雑なアルゴリズムや計算能力の増強が必要になった場合には、容易にPCのアップグレードを行うことができる。

3 光学的原理による光学特性の制御

薄膜光学フィルタは、反射または透過(あるいは両方)により、光の性質を所定のものに変える働きを持つ光デバイスである。従って、光デバイス作成の制御モニタには、光学的原理を用いた計測法が最も優れている。

薄膜の制御モニタは、当初、水晶振動子法が用いられていた^[10]。この方法は信頼性は高いが、実際の基板を直接測定していないため、蒸着チャンバ内部の膜厚分布をあらかじめ知っておく必要がある。これは加熱蒸着法に対しては比較的簡単なことだが、PECVDなど他の多くの成膜法にとって大きな障害となる。もう一つの欠点は、材料の密度を正確に把握しておく必要がある

が、実際はこれがわかっているとは限らない点である。広帯域透過分光法は精度が高く、現在、薄膜モニタとして広く使われている^{[11][12]}。この方法の欠点は、基板と蒸着材料が計測波長範囲で透明で、かつ安定な光源が必要になる点である。

理想的な計測方法としては反射測定を基本とし、振幅と位相の両方を計測できるものが良い。これに適合するのがエリプソメトリである。本法は、s偏光(r_s)とp偏光(r_p)の複素振幅反射率の比 ρ を測定する原理に基づく計測方法である(式(1))^[13]。

$$\rho = \frac{r_p}{r_s} = \tan \Psi e^{i\Delta} \quad \dots\dots(1)$$

位相変調式エリプソメータ(PME:Phase-Modulated Ellipsometer)は、パラメータ I_s と I_c から、楕円偏光の状態を示す位相差 Δ と振幅比率(振幅反射率 r_p と r_s の比率)を決定する。ここで I_s と I_c は、試料表面で反射した後に検出される偏光の基本変調周波数の第一次高調波及び第二次高調波の強度である(式(2))。

$$I(t) = I_1 [I_0 + I_s \sin \delta(t) + I_c \cos \delta(t)] \quad \dots\dots(2)$$

I_s と I_c はエリプソメータのデジタル信号処理ユニットから直接得ることができ、演算処理はすべて外部のコンピュータで実行される。

エリプソメトリにおけるデータ解析は、通常モデリングすることにより行われる。このため、正しいモデルを選択することが非常に重要な課題となる。

変調器及び検光子の角度がそれぞれ0°及び45°の場合(PME構造のリアルタイム解析には最適な角度)、 I_s と I_c は式(3)により複素反射率と関連付けられる。

$$I_s = 2 \operatorname{Im} \left(\frac{r_s r_p^*}{r_s r_s^* + r_p r_p^*} \right) = \sin 2 \Psi \sin \Delta \quad \dots\dots(3)$$

$$I_c = 2 \operatorname{Re} \left(\frac{r_s r_p^*}{r_s r_s^* + r_p r_p^*} \right) = \sin 2 \Psi \cos \Delta$$

ここで振幅反射率 r_p と r_s は、表面粗さがゼロで半無限の大きさを持った基板を使った時の特性を表している。

その他の場合はすべて、各層の光学定数並びに厚さを求めるために、試料に関する予備知識に基づいたモデリングが必要となる。多層膜の複素反射率は、標準的なAbelesの変換マトリックス法によって計算可能である。つまり、各層は、直線偏光成分(-sまたは-p)、入射角、各層の膜厚と複素屈折率、波長によって表される1つのマトリックス“M”によって定義される。そして、多層膜全体の複素反射率は、各層ごとマトリックスMを掛け合わせることににより算出できる^[14]。

生のデータを得た後で次のいずれかのモードが選択できる。

- (1) 非線形最小二乗フィッティングまたは数値転換によって成長速度(厚さ)及び屈折率の計算を実行する。
- (2) 目標の厚さ及び屈折率を用いて、偏光軌跡をあらかじめ計算しておいた値と比較しながらリアルタイムに成長条件をコントロールする。

PECVD法による薄膜の屈折率は、ガスの組成、マイクロ波電力、プロセス圧力、基板温度などプロセス・パラメータによって左右される。ガスの組成は膜特性に対する決定的な要素であるため、ガスの流量制御が重要な課題となる。エリプソメータは基板の表面付近で生じる現象に関する正確な情報を与えてくれるセンサである。エリプソメータの出力信号に基づき、MFCをコントロールしてガスの流量を最適化するアルゴリズムが大変重要になる。つまり、PECVDの将来は、インテリジェントな流量制御方法の開発次第であるとも言える。

3.1 偏光軌跡モデルを用いたプロセス制御

偏光軌跡とは、蒸着時間(膜厚)に対して、実測あるいは計算によるエリプソメトリのパラメータをプロットしたカーブのことである。パラメータ I_s 及び I_c は、蒸着時間の関数として表すことができる。これらのパラメータが変化する速度は、膜の成長速度、複素屈折率、及び I_s と I_c の初期値と関連がある。

I_s - I_c 空間の軌跡を用いると、図2に示すように、時間の項を取り除くことができ、成長速度の不安定さに起因する誤差を防ぐことができる。但し、屈折率の安定性が非常に重要になる。我々はこのような制御方法を、“距離制御”と“長さ制御”と呼んでいるが、いずれも膜の屈折率が既知でかつ安定していることが前提条件となる。

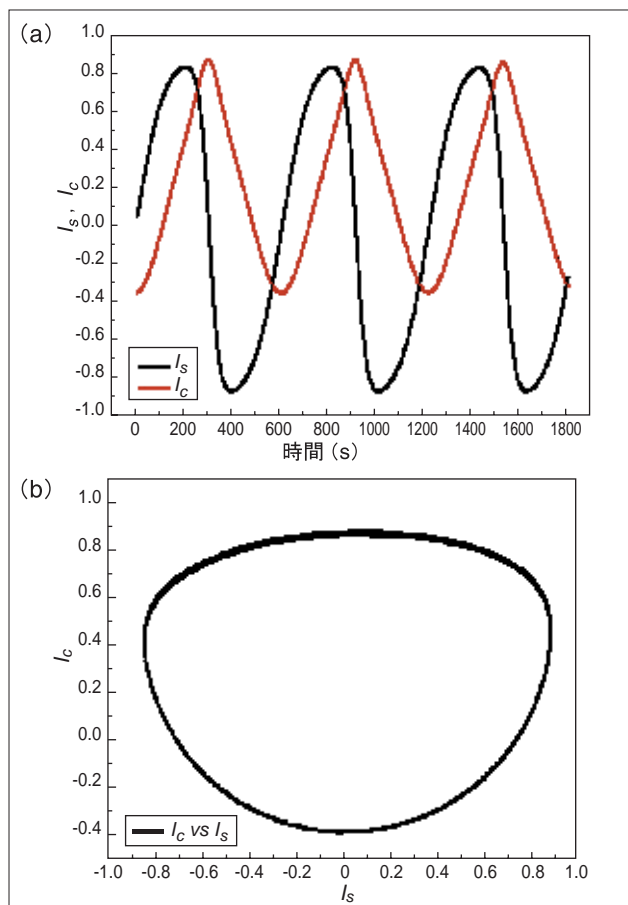


図2 偏光軌跡
(a) 時間に対する I_s , I_c の偏光軌跡
(b) 相互の偏光軌跡

3.1.1 距離制御

偏光距離制御^[15]の場合、性能関数は式(4)で定義される。

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^N (I_s(t, \lambda_i) + I_{s,end}(\lambda_i))^2 + (I_c(t, \lambda_i) - I_{c,end}(\lambda_i))^2 \dots \dots (4)$$

ここで、波長 λ_i は測定波長、 $I_s(t, \lambda_i)$ は時間tにおける実測値、 $I_{s,end}(\lambda_i)$ は各層のエンドポイントにおける目標値を示す。

各層の蒸着中に χ^2 がリアルタイムで算出されており、現在成長中の層の性能関数が最小値になると直ちにその層のエンドポイントであることがフィードバックされて、次層の蒸着開始の指示が出る(図3)。但し、蒸着停止のコマンドは、次層成長の開始後しばらくは実行されない。これは、終了点が同一層の開始点に近い場合に、間違っ

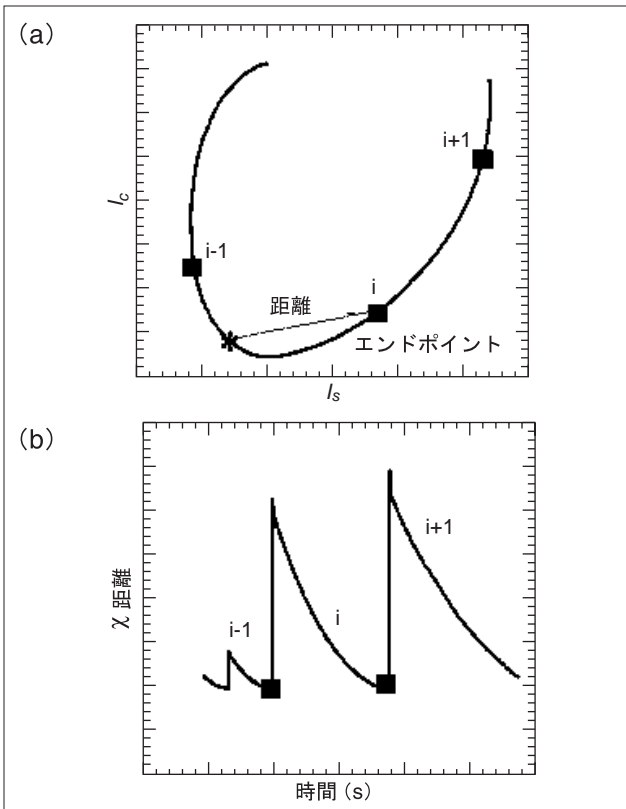


図3 I_s - I_c 軌跡を用いた距離制御アルゴリズム

この制御法は、屈折率が安定で、成長速度が数nm/sを越えないような場合に正確かつ効果的である。これは、 χ^2 が最小値を越えた後に蒸着を終了させるためである。シランをベースとしたPECVDプロセスでは、酸化性ガスが過剰に存在する場合のみ最初の条件を満たすことができる。これには、高い成長速度を得るための強力なポンプが必要になる。一方、2番目の条件は、成長速度を最小値に達する少し前に下げることにより軽減される。各層が透明であることに気を付けなければならない。不透明になると、偏光軌跡が劣化して点になってしまう。

エンドポイントは事前に I_s - I_c カーブであらかじめ計算されており、実際のエンドポイントはこの計算値とできる限り近い必要がある。最初の層で生じた計算誤差は次に続く層にも誤差を誘発させ、最終的にフィルタの特性を劣化させてしまう。従って、基板の特性の正確な把握が絶対に必要となる。しかしながら、すべての基板の特性を完全に把握することは不可能である(フロートガラスはその一例)。前提条件があるとは言え、本制御法はガラスやプラスチック上の1/4波長光学フィルタには非常にうまく適用することができた^{[2][7]}。

目標とリアルタイム測定結果、及び、フィルタのスペクトル性能を図4に示す。帯域幅の不一致は高屈折率材料(SiNx)の低屈折率側へのずれに起因し、制御パラメータの実測値と目標値との違いは異なったX軸変数のみに起因する。実際、この手法は、図4に示すように成長速度の変動に対して鈍感である。

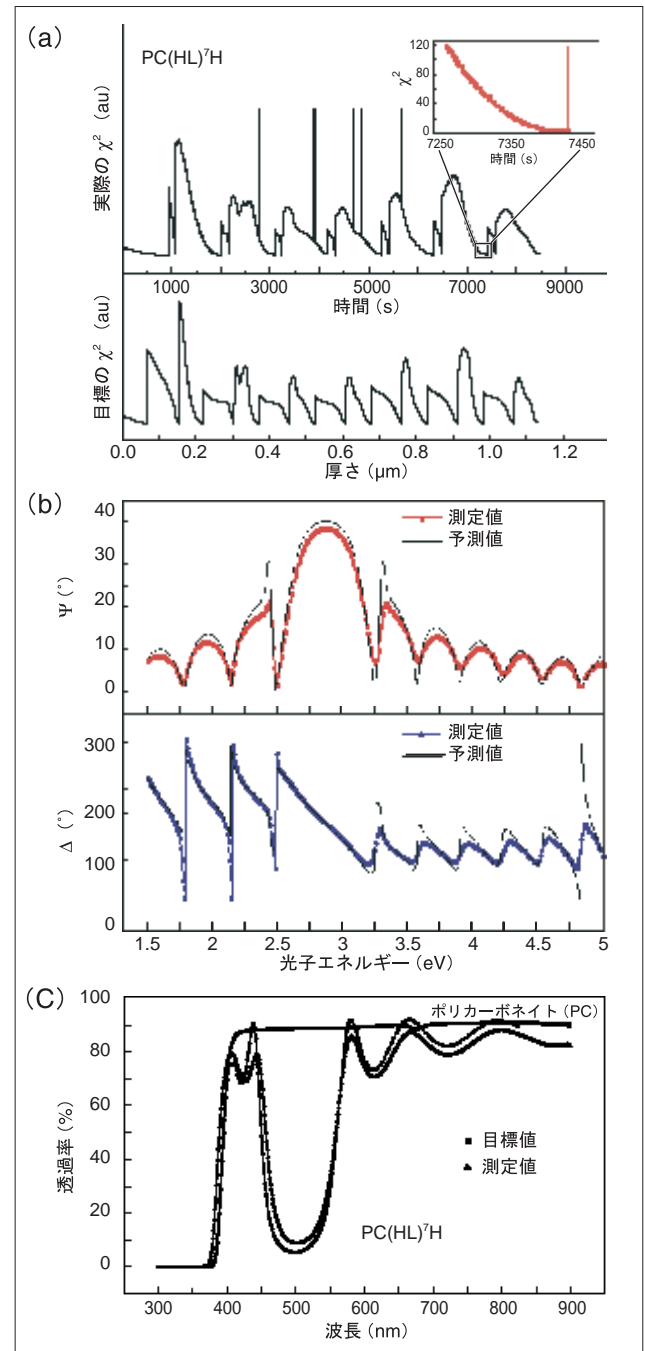


図4 距離制御アルゴリズムを用いてポリカーボネイト基板上に成長形成させた光学フィルタ(15層)の目標値と記録値の変化
(a) 制御パラメータ
(b) 偏光スペクトル
(c) 透過スペクトル

3.1.2 長さ制御

薄膜制御のために偏光軌跡の長さを利用する手法^[15]は、従来は、単に最小値の検知ミスを防ぐために予測エンドポイントの近辺に距離制御アルゴリズムを働かせるためのものであった。

この手法は、図5に示すように、実測軌跡の長さ l_s と目標軌跡の長さ l_c とをリアルタイムに比較することにより制御を行う。長さ制御用の制御パラメータ Λ は、式(5)で定義される^[5]。

$$\Lambda = \sum_{i=1}^N [L(t, \lambda_i) - L_{end}(\lambda_i)] \dots\dots\dots(5)$$

ここで、 $L(t, \lambda_i)$ は、実測長さであり、 $L_{end}(t, \lambda_i)$ は目標軌跡の長さである。

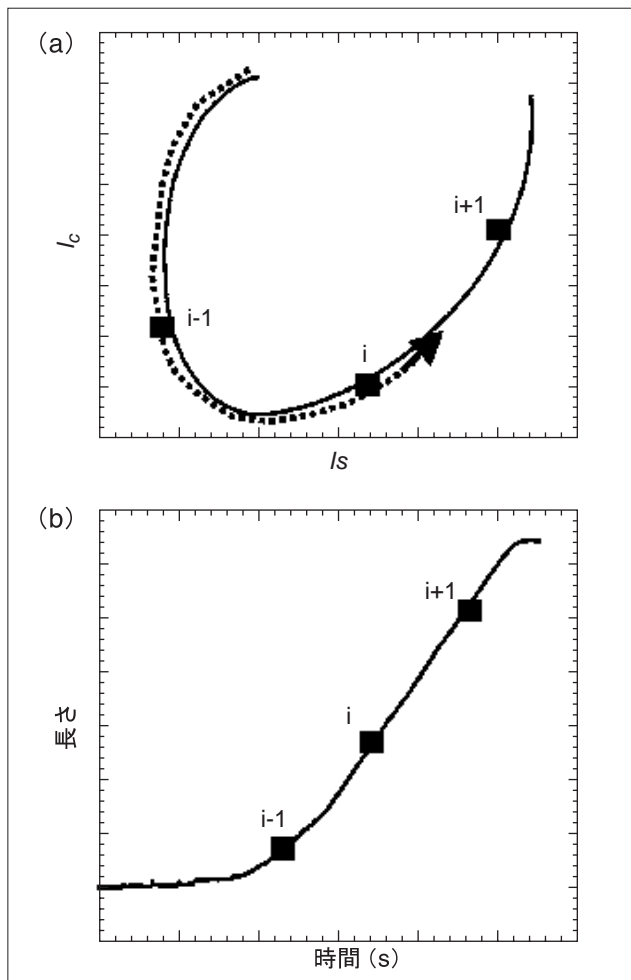


図5 l_s - l_c 軌跡を用いた軌跡長さの制御アルゴリズム

- (a) l_s - l_c 軌跡
- (b) 時間対長さ

各層の蒸着中に Λ を計算し、この値が正になるとすぐに蒸着を停止し、次層の蒸着を開始する。軌跡の長さに主に影響を与えるのは光学的厚さであり、また基板のパラメータを決定する上での誤差は、主に軌跡全体のずれとして現れる。従って、軌跡長さを使うと、屈折率のわずかな変動に起因する誤差を軽減するのに役立つことになる。

特性が明確な基板の場合には、本制御方法は距離制御に相当する。しかし、長さ制御法は、基板モデリングの不完全さの影響を受けにくい点が長所である^[16]。この点は、正確な構造がわかっていない試料の場合に特に有利に働く。この手法は未蒸着基板に対してはぴったりと適合するが、既にコーティングされた基板の上に蒸着する際にはあてはまらないこともある。このような典型的な例としては、市販のフロートガラスがある。

一方、基板の疑似誘電体膜機能を用いると高い精度で軌跡を計算することができる。これは、透明な等方性材料に対しては、多層構造の光学特性を2層構造と等価と見なしてモデリングできるためである^[14]。これは、酸化シリコンをベースとした勾配型の広帯域反射防止膜(ARC)の蒸着制御に用いられる。

このARCはトータル厚み0.26 μm の20層から成る多層膜構造で、各層の厚さは1~25 nm、屈折率(632.8 nm)は1.46(SiO_2)~1.91(SiN_x)で変化する。そして、300~800 nmにおける透過率を、片面で4%、両面で7%上昇させるように設計されている。

プロセスのパラメータを校正するために、酸素対窒素の比率を0から2.5までの範囲で8つの異なる条件で蒸着した。中間の屈折率を有する層に対するガス流量は、これらの値から内挿した。図6に屈折率分布と透過スペクトルを示す。400 nm~700 nmで、透過率が約4%上昇(91%から95%)しており、制御が効果的かつ正しく行われたことがわかる。

この手法を使ってさまざまな光学デバイス(反射防止膜や熱反射フィルタ)を製作した。しかし本法を使って蒸着プロセスを効率よく制御するためには、屈折率及び蒸着速度をあらかじめ知っておくことが必要という課題は残っている。

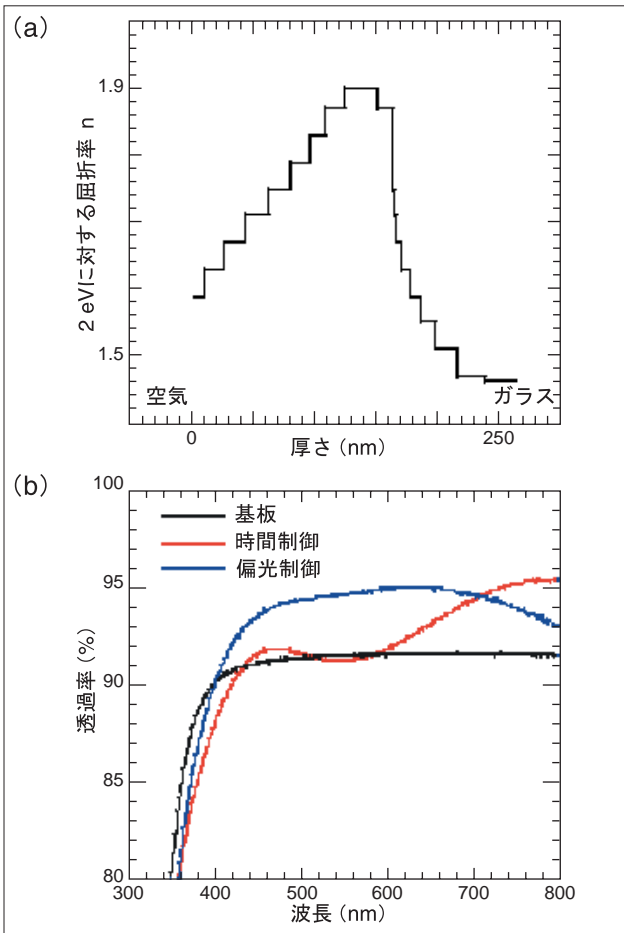


図6 フロートガラス基板上の反射防止コート(0.26 μm)の屈折率分布と透過スペクトル
 (a) 反射防止コート(0.26 μm)の屈折率分布
 (b) フロートガラスの透過スペクトル

3.2 屈折率及び蒸着速度による制御

あらかじめ計算された軌跡に基づく制御方法は簡単で効率が良いが、実際に適用しようとするときと制約される場合も少なくない。屈折率が安定だという仮定が実状に合わないケースもある。現実のプロセスでは屈折率が変動することは避けられないし、時には、それが設計要素である場合もある。

3.2.1 数値転換法

ダイレクト数値転換法は、実測値 $dI_{c,s}$ (誘電率 ϵ の多項関数)変化と、新しく成長した層の厚さ d_x に基づいている。本法の数学的な取り扱いはかなり複雑なため、詳細は別稿^{[3][4]}を参照していただくことにし、ここでは実験結果と、本法の限界を紹介する。

屈折率の範囲を校正した上で、ポリカーボネイト基板と引っかき防止用シリコン酸化膜との間に屈折率が直線的に変化する層と屈折率整合層を蒸着することにより、数値転換アルゴリズムをテストした。校正中に得られたパラメータは、ガラス基板上に直線的に変わる屈折率を持つシリコン・オキシ・ナイトライド(SiON)層を蒸着させる際に用いた。この膜は酸化シリコンから窒化シリコンに直線的に変化する2100 Åの層から成っている。この層の両端には、勾配の変化を明確にするために厚さ500 Åの高屈折率及び低屈折率のシリコン・オキシ・ナイトライド層を形成させた。積層膜のトータル厚さは、目標値より約6%高い3287 Åであった。屈折率が直線的に変化していることから、成長速度が非常に良く再現されていることがわかる(図7(a))。蒸着完了後、1.5~5 eVの間を0.025 eV間隔で測定した偏光スペクトルを図7(b)に示す。

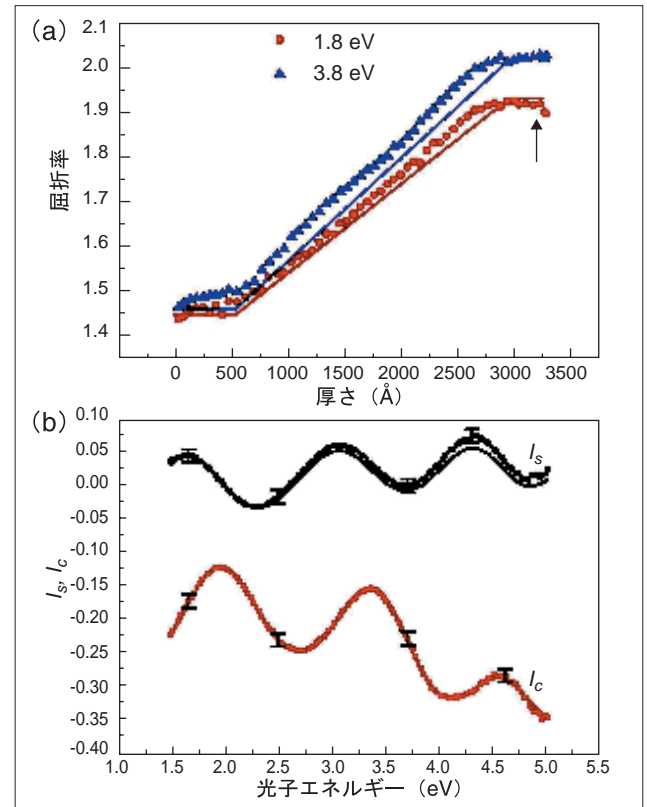


図7 数値転換アルゴリズムをリアルタイム制御に用いた時の屈折率勾配
 リアルタイムに制御された勾配層の厚さは3287 Åであったが、分光測定値から決定した厚さは3253 Å。
 (a) リアルタイム動的データ
 (b) 分光モデリング

このような多層構造は、屈折率が一定の2層の間に線形勾配の屈折率を持っているものとしてモデリングされたものである。これら2層の分散式は、それぞれの層の厚さと同様、フィッティング・パラメータとして選択されている。 χ^2 が0.46で、最高のフィッティングができ、特に屈折率分布の傾斜に敏感な偏光強度 I_p に対してあてはまる。分光フィッティングによって得られた全体の厚さ(3253 Å)と屈折率は、再生アルゴリズムの結果と非常によく一致している。最終層の厚さは分光フィッティングにより決められるものであるが、再生アルゴリズムで得た厚さより薄い。しかし、分光フィッティングの結果と再生プロファイルとの違いは、実験上の不確定性に起因していることを認識しておかなければならない。

最終的に、プロセスの校正用に得たデータは、ポリカーボネイト基板とPECVD蒸着した引っかき防止シリコン酸化膜の間に屈折率整合用の中間層を蒸着する際に適用した。このような膜構成では干渉影響が抑えられ、均一な単層でコーティングされた基板と比べるといくつかの利点がある。例えば、試料を傾けた時に生じる“着色効果”がかなり抑えられる。このような屈折率整合層を設計するいくつかの手法が知られている。

我々は単純なガウス形を適用した。屈折率整合層の膜厚は500 nmに固定し、屈折率は図8(a)に示すように50段階に分割した。屈折率及び成長速度は、前もって求めておいた校正パラメータを用いて算出した。図8(b)は、厚さ5 μmの引っかき防止膜でコーティングされたポリカーボネイト基板の透過を、屈折率整合層がある場合とない場合と比較したものである。干渉縞の振幅は、全可視領域において絶対透過率が2%以上から、0.3%以下にまで低下している。これは、高屈折率シリコン・オキシ・ナイトライド層の屈折率が、ポリカーボネイト基板と非常によく一致していることを示している。また、屈折率整合層のガウス形が非常に良く再現されていることがわかる。更には、我々の数値転換法を制御に使うことが有効であることを実証するものであり、これにより、プロセス校正に必要な時間をかなり短くすることが可能になる。これは、プロセス全体が1回で検査されるためである。

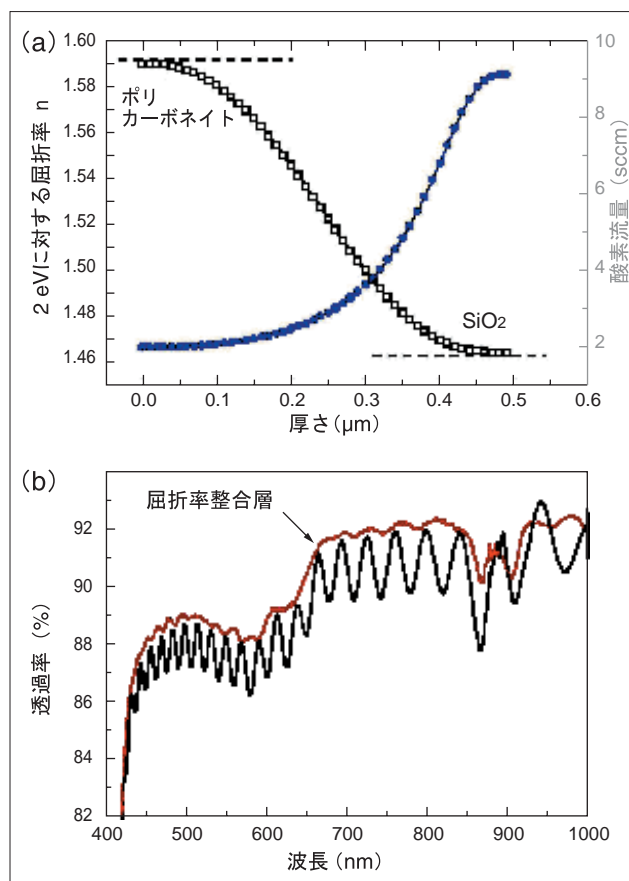


図8 カラー効果を抑制する屈折率整合層
 (a) 勾配型屈折率整合層の屈折率分布
 (b) 厚さ5 μmの引っかき防止SiO₂膜をコーティングしたポリカーボネイト基板の透過スペクトル (屈折率整合層の有る場合、ない場合)

このように数値転換法は正確で高速(16波長で150 ms)なため、屈折率が変化する膜の計測・制御用として新しい強力なツールとなっている。近い将来、屈折率勾配型光学フィルタのプロセス制御へ発展する可能性がある。しかし、予想しないような中間層が形成されると、数値転換アルゴリズムの安定性が低下する可能性がある。つまり、本アルゴリズムは屈折率勾配型の光学フィルタにはうまく適用できるが、標準的な多層膜には必ずしも十分ではない。

3.2.2 リアルタイム最小二乗フィッティング

そこでJYでは、任意の構造の多層膜に適用でき、しかも成長中の膜の複素屈折率と厚さを正確かつリアルタイムに決定することができる最小二乗フィッティング・アルゴリズムを開発した。なお、これには次のような前提条件を設定した。

(1) 生データの取り扱い

すべての平行偏光成分は、平滑化せずに“n”及び“k”を決定するために別々に処理される。また、複素屈折率(初期の推測を除く)をフィッティングするための分散式を仮定しない。

(2) データのフィルタリング

直前の演算ポイントからの変化がノイズレベルを越えない場合のみ、新たな点として処理する価値があると判断する(判定の閾値はノイズレベルの2倍に設定。この値は典型的な条件下の I_s-I_c 値に対して0.01に相当する)。

(3) 最小演算負荷

膜厚は最初に予測した分散式にフィッティングし、満足する結果が得られない場合のみ、“n”及び“k”値のフィッティングを行う(同一層内は一定と仮定し、厚さのみが変化すると見なす)。

(4) データバッファリング

測定を安定化させるために大きさを調整できる可動窓を使用する。

アルゴリズムに関する詳しい説明は他の論文を参照していただくことにし、本稿では結果だけをいくつか示す。屈折率がわかっている材料(SiO_2)に対する成長速度(厚さ)の決定、異なる屈折率を有する4つのオキシ・ナイトライド層に対する成長速度及び、屈折率の同時決定の両方についての試験を実施した結果を図9、図10に示す。

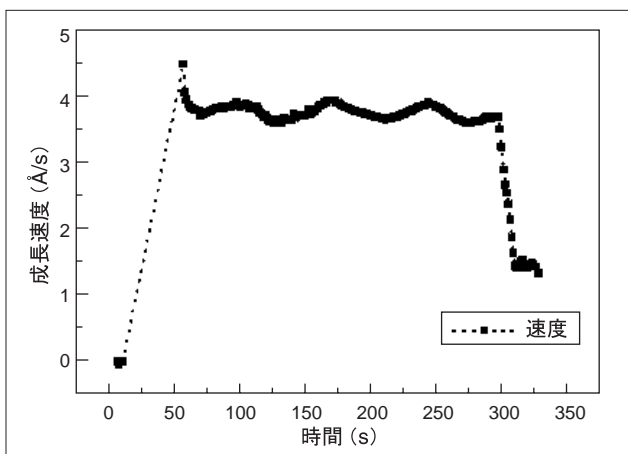


図9 c-Si基板上への SiO_2 (厚さ100 nm)の蒸着速度変化

厚み精度0.1%で、動的データと蒸着後の分光スペクトルは完全に一致している。

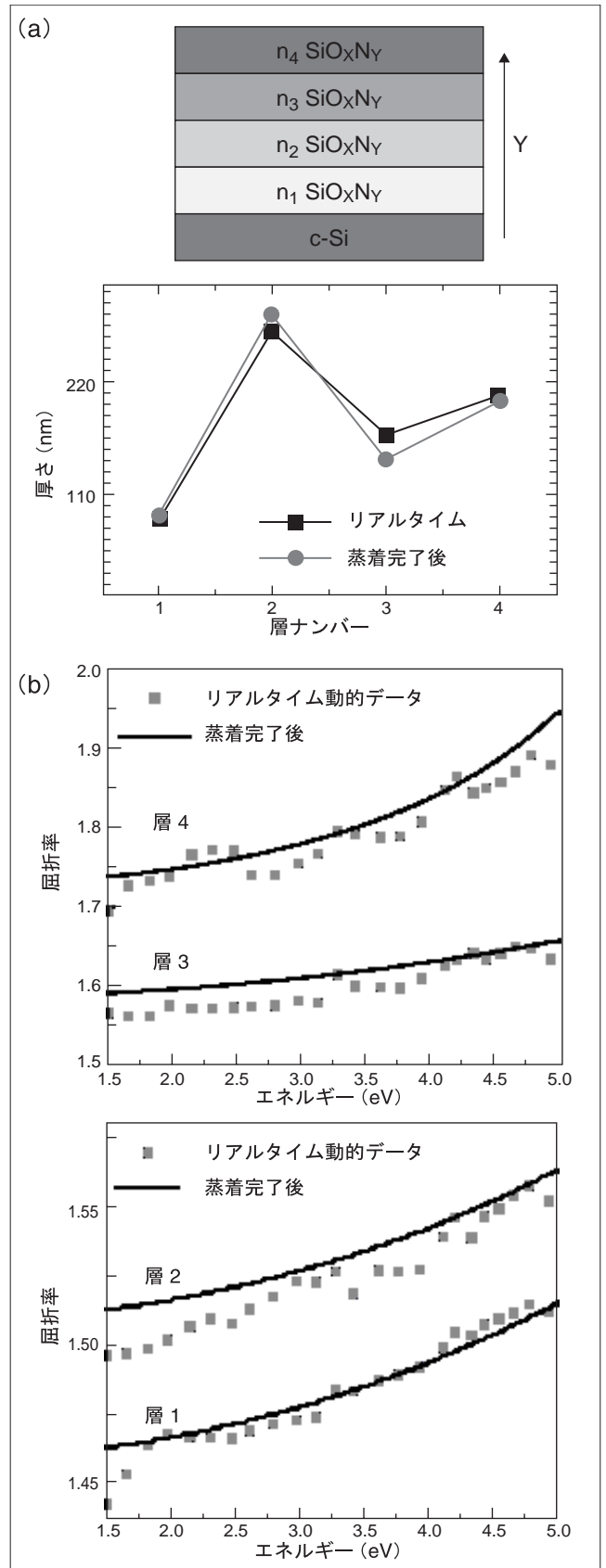


図10 リアルタイム測定結果と蒸着完了後の特性比較

(実線は分光データを古典的なローレンツ分散関数に合わせた結果を示す)。

(a) 膜の構成と厚さ

(b) エネルギーと屈折率

屈折率が既知の材料の場合には非常に良い結果が得られており、ガスの流量を調整することによって膜厚及び成長速度を高精度にコントロールできることがわかる。目標の厚さを通り越さないように、シラン流量をエンドポイントに到達する前に自動的に低下させた。10回以上蒸着したが、最終的な厚みの誤差は、非常に薄い層(最大30 nm)でも非常に厚い層(最大500 nm)でも、共に0.3%以下であった(通常約0.1%)。

オキシ・ナイトライド4層に対する蒸着でも、非常に期待の持てる結果が得られた。単に膜厚と屈折率の両方をリアルタイムかつ正確に決定するだけでなく(誤差:1%以内)、測定を妨害するようなノイズは生じなかった。

最近の実験から、水素処理非晶質シリコンのような吸収率が高い材料の場合でも、この手法はよく機能しており、正確な多層膜(a-Si:H/SiO₂)を形成することがわかっている。実験結果は別途報告する^[17]。リアルタイム最小二乗フィッティング法は、画期的な蒸着制御方法である。

屈折率の決定精度は1%以内、膜厚とエンドポイントの検出精度は1%~0.1%である。但し、後者は屈折率がわかっている層に対して最小二乗フィッティング・アルゴリズムを使って日常作業で得られたものである。本手法の妥当性を立証するために、いろいろな構造を持った薄膜に付いて試験したが、いずれも可能性に富む結果が得られた。

最大32波長を同時に計測できるJYの分光エリプソメータUVISELを、多層膜光学フィルタ蒸着用のリアルタイム・コントローラとしてより幅広く使っていただけることを願っている。

4 おわりに

以上、マルチチャンネル分光エリプソメトリを使った光学フィルタ及び薄膜形成のモニタリング・制御方法の原理と実測例を紹介した。また、リアルタイムに計測された偏光軌跡とあらかじめ計算された軌跡とを比較することによって高精度に膜厚制御する方法と、屈折率と成長速度を決めない制御方法の2通りのアプローチについて検討した。一つは、ダイレクト数値転換法であり、もう一つは、偏光データのリアルタイム最小二乗フィッティングである。

これらは共に薄膜成長の正確な制御に必要なモニタリング速度と精度を有しており、前者は勾配構造を持った膜構造に、後者は多層膜に適している。いずれのアルゴリズムも、有限の大きさを持った透明基板(インコヒーレント反射の影響がある)及び、透明・低吸収膜(高吸収膜に対しても最小二乗フィッティングが可能)の半無限体基板の双方に適用できる。

これらの手法は広範囲に適用することが可能であるが、本稿ではPECVDで成長させたシリコンベース膜を選択した。形成中の膜厚が所定値に到達するとシランの流量を少なくして、成長速度を落とす簡単なアルゴリズムを適用することにより、絶対精度を0.3 nm, 相対精度を0.3%へと改善させることができた。

参考文献

- [1] R. Brenot, B. Drevillon, P. Bulkin, P. Roca i Cabarrocas, R. Vanderhaghen, Appl. Surf. Sci. 154-155, 283 (2000)
- [2] M. Kildemo, P. Bulkin, B. Drevillon, O. Hunderi, Appl. Opt. 36, 6352 (1997)
- [3] D. Kouznetsov, A. Hofrichter, B. Drevillon, Appl. Opt. 41, 4510 (2002)
- [4] A. Hofrichter, D. Kouznetsov, P. Bulkin, B. Drevillon, Appl. Opt. 41, 4519 (2002)
- [5] S. Henk, W. Duncan, L.M.Lowenstein, S.W. Butler, J. Vac. Sci. Technol A 11, 1179 (1993)
- [6] D.E. Aspness, N. Dietz, Appl. Sur. Sci. 130-132, 367 (1998)
- [7] P. Bulkin, A. Hofrichter, T. Heitz, J. Huc, B. Drevillon, and J.J. Benattar, J. Vac. Sci. Technol. A 20, 338 (2001)
- [8] J. Pelletier, T. Lagard, Thin Solid Films 241, 240 (1994)
- [9] D. Daineka, P. Bulkin, G. Girard, J.-E. Bouree and B. Drevillon, Eur. Phys. J. Appl. Phys. (to be published)
- [10] H.A. Macleod, Thin Film Optical Filters, 2nd edn. (Adam Higler, Bristol, 1986)
- [11] B. T. Sullivan, J.A. Dobrowolski, Appl. Opt. 32, 2351 (1993)
- [12] B. T. Sullivan, G.A. Clarke, T. Akiyama, N. Osborn, M. Ranger, J.A. Dobrowolski, L. Howe, A. Matsumoto, Y. Song, K. Kikuchi, Appl. Opt. 39, 157 (2000)
- [13] B. Drevillon, Progr. Cryst. Growth Charact. Mater. 27, 1 (1993)
- [14] F. Abeles, Ann. Phys. (Paris) 5, 596 (1950)
- [15] M. Kildemo, P. Bulkin, S. Deniau, B. Drevillon, Appl. Phys. Lett. 68, 3395 (1996)
- [16] A. Hofrichter, T. Heitz, P. Bulkin, B. Drevillon, J. Vac. Sci. Technol. A 20, 702 (2002)
- [17] D. Daineka, P. Bulkin, G. Girard, J.-E. Bouree, B. Drevillon accepted for presentation at CIP'2003 Coloquium (14th International Colloquium on Plasma Processes, 30 June - 3 July, Antibes, France)



Bernard Drévillon, PhD

CNRS Ecole Polytechnique
Thin Film Laboratory
Research Director, Professor



Pavel Bulkin, PhD

CNRS Ecole Polytechnique
Thin Film Laboratory
Research Engineer