

光学薄膜作成装置の現状について

真空器械工業株式会社 大工原 茂樹

Modern plants for optical thin-film coating

Shigeki Daikuhara

Shinku-Kikai Kogyo Co., Ltd.

1. はじめに

薄膜の光学的現象は古くから知られていたようである。しかし記録としては、それほど古いものではない。光学薄膜に関する著書¹⁾²⁾により、その歴史を顧みると、薄膜が膜厚により、さまざまに色を変える現象の発見は17世紀のR. BoyleとR. Hookeにまでさかのぼる。これはI. Newtonの詳細な研究により、今日ではニュートンリングと呼ばれている現象である。Newtonはこれを粒子説で説明したが、それから100年以上も経た1801年にT. Youngはこの現象を波動論による干渉の原理で説明できることを報告した。Youngの理論ははじめは認められなかったが、A. J. Fresnelらにより支持され、光の波動論的な研究が進められ、しだいにその理論が確立されていく。

光学薄膜の応用面に目を向けると、1887年J. W. Rayleighは古くなったクラウンガラスの表面の反射率が、新しく磨かれたガラス面のそれより小さいことを報告した。また、1896年H. D. Taylorはヤケの生じた古いレンズが、きれいなレンズより高い透過率を持っていることを報告し、ガラスの表面に化学的にヤケを作る技術を開発した。これは薄膜の光学的応用研究のはじまりと言える。この現象は、1934年にG. Bauerにより表面薄膜の干渉効果として説明された。それ以後、

ガラス表面の反射防止膜の研究は急速に進み、さらに真空蒸着によるコーティング技術も確立され、しだいに多層数の光学薄膜が実用化されていくことになる。

本稿では、現在、光学薄膜を作成するのに利用されている真空蒸着装置を紹介し、さらに最近利用されはじめている新しい真空薄膜作成技術と、その装置についても紹介する。

2. 光学薄膜について

2.1 基本的理論

光学薄膜についての詳細な説明は、いくつかの名著¹⁾²⁾があるので御参照いただくこととし、ここでは、ごく簡単に、単層薄膜の光の干渉効果について述べる。

Fig. 1のように、透明基板上に形成された透明薄膜の片面のみの反射を考える。光は電磁波であるから、反射光量 $R_1 + R_2$ は、 R_1 と R_2 の位相差により変化する。この位相差は、 R_1 と R_2 の行程差によって生ずる。つまり、薄膜の形状膜厚 d と屈折率 n_1 に依存する。ここで、光が垂直に入射した時の反射率 R は、次式で表わされる。

$$R = 1 - \frac{4n_1^2 n_s}{n_1^2(1+n_s)^2 + (1-n_1^2)(n_s^2 - n_1^2) \sin^2 \delta}$$

ただし、

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} n_1 d_1$$

ここで、 n_s ：基板の屈折率、 n_1 ：薄膜の屈折率
 λ ：光の波長、 d_1 ：薄膜の形状膜厚
 である。

$n_1 d_1$ を光学的膜厚と呼ぶが、位相 δ は λ と $n_1 d_1$ の関数であり、 $n_1 d_1$ が $\lambda/4$ の整数倍の時、反射率 R は極値をとる、すなわち

$$n_1 d_1 = \frac{\lambda}{4} + m \cdot \frac{\lambda}{2} \quad (m=0, 1, 2, \dots)$$

において、 $n_s < n_1$ のとき極大値、 $n_1 < n_s$ のとき極小値、

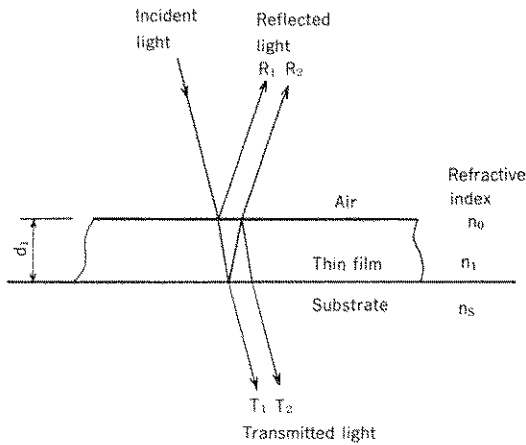


Fig. 1 A single thin film

$$n_1 d_1 = m \cdot \frac{\lambda}{2} \quad (m=0, 1, 2, \dots)$$

において、 $n_s < n_1$ のとき極小値、 $n_1 < n_s$ のとき極大値となるような周期関数となる、 $\lambda=600 \text{ nm}$ で図示すると Fig. 2 のようになる。これからわかるように、基板の屈折率より膜の屈折率が小さい場合には反射防止膜となり、逆の場合には反射増加膜となる。また、光学的膜厚が $\lambda/4$ の奇数倍になるように成膜すれば、その効果が最も大きい。ここで、膜に吸収がなければ、反射光量と透過光量の和が入射光量となるので、反射光量が減少すれば、透過光量はその分だけ増加する。

2.2 光学薄膜の例

実際の光学薄膜は、いくつかの屈折率の異なる物質を組合わせて設計されている。ここでは、いくつかの例を紹介する。

Fig. 3 は、 MgF_2 (屈折率 1.38) の単層反射防止膜の例である。基板の屈折率の違いで、このように分光特性が変化する。

Fig. 4 は、眼鏡の 3 層反射防止膜の例である。また Fig. 5 は、14 層で構成された短波長透過フィルターである。これは、反射光についてみれば、赤のみを反射するダイクロイック・ミラーとも言える。これらのように、光学薄膜は種々の物質の薄膜を組合わせて、希望する反射、透過の分光特性を作るものと理解していただきたい。

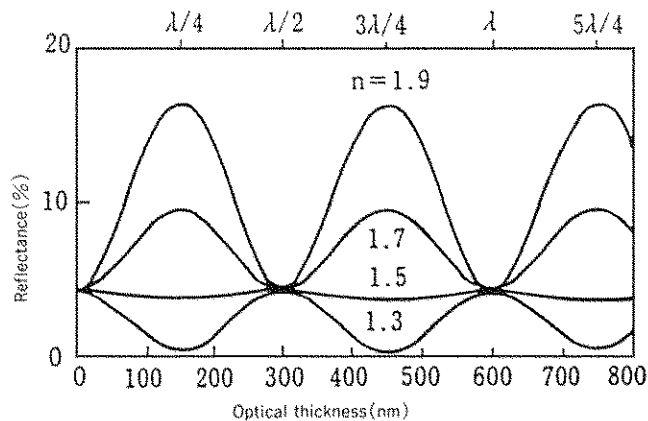


Fig. 2 The variation with thickness of the reflectance of several films with different refractive indices. (Refractive index of the substrate $n_s=1.52$, Wavelength $\lambda=600 \text{ nm}$)

光学薄膜を分類すると次のようになる。

- (1) 反射防止膜
- (2) 反射増加膜 (金属, 誘電体によるミラー)
- (3) フィルター
 - a) エッジフィルター (長波長透過, 短波長透過フィルター)
 - b) 帯域フィルター (広帯域, 狭帯域)
 - c) その他
- (4) ビームスプリッター (金属, 誘電体)

上記の薄膜は, 目的に応じて, 単層から 100 層程度で構成される。

3. 光学薄膜作成装置

現在, 光学薄膜はほとんどが真空蒸着によって作成されている。これは $10^{-5} \sim 10^{-7}$ Torr 程度に排気した真空容器中で, 誘電体または金属を加熱蒸発させ薄膜化する方法である。Fig. 6 に装置構成例を図示し, 以下に各部を説明する。

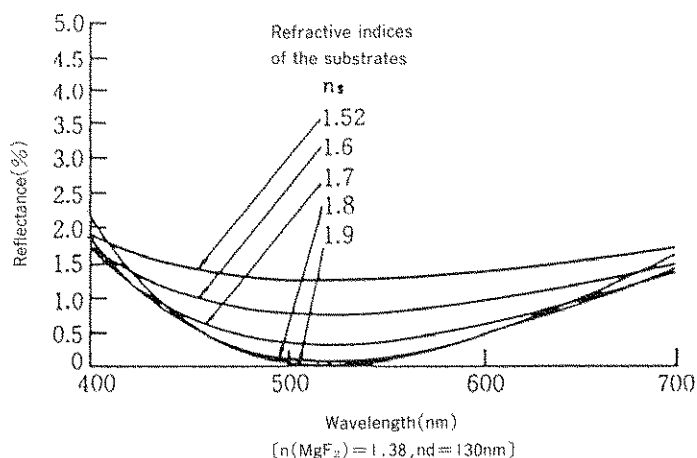


Fig. 3 Spectral reflectance of a single surface of several substrates with different refractive indices coated with a single layer of MgF_2 .

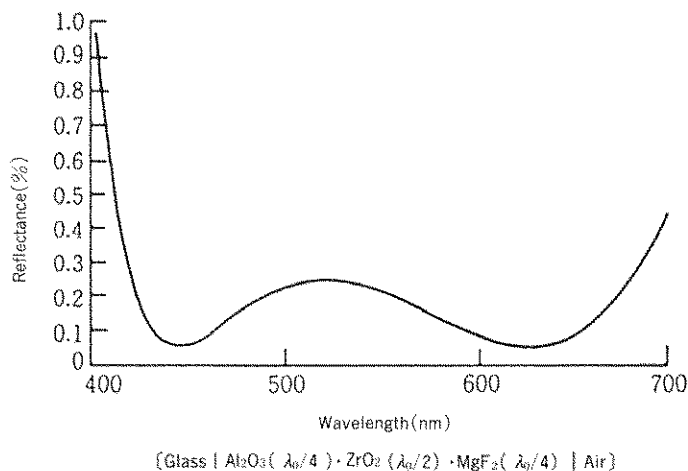
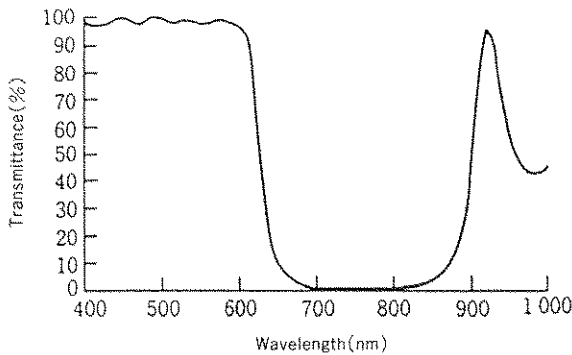


Fig. 4 Spectral reflectance of three-layer antireflection coating for glass.



n	n d	n	n d
1.00	MEDIUM	7 : 2.30	1.000
14 : 1.46	0.500	6 : 1.46	1.000
13 : 2.30	1.000	5 : 2.30	1.000
12 : 1.46	1.126	4 : 1.46	1.000
11 : 2.30	1.000	3 : 2.30	1.000
10 : 1.46	1.000	2 : 1.46	1.000
9 : 2.30	1.000	1 : 2.30	1.212
8 : 1.46	1.000		1.52 SUB.

Fig. 5 Spectral transmittance of shortwave-pass filter.

3.1 真空排気系

3.1.1 あらびきポンプ

高真空ポンプが使用できる 10^{-2} Torr 台まで排気するのに用いるポンプである。通常、油回転ポンプが使用され、必要に応じてメカニカルブースターポンプが付加される。要求される膜特性によっては、真空室へのオイルバックを極端にきらい場合があり、最近では油を用いないドライポンプも使用されている。

3.1.2 高真空ポンプ

光学薄膜作成装置に用いられる高真空ポンプは拡散ポンプまたはクライオポンプである。その他に、小型の装置ではターボ分子ポンプが使用されることがあるが、現時点では、最も大型のものが 5000 l/s 程度の排気速度なので普及するには至っていない。

(1) 拡散ポンプ

古くから用いられているポンプであるが、現在も最も多く使用されている。水蒸気 (H_2O) に対する排気速度が大きくないため、液体窒素トラップ

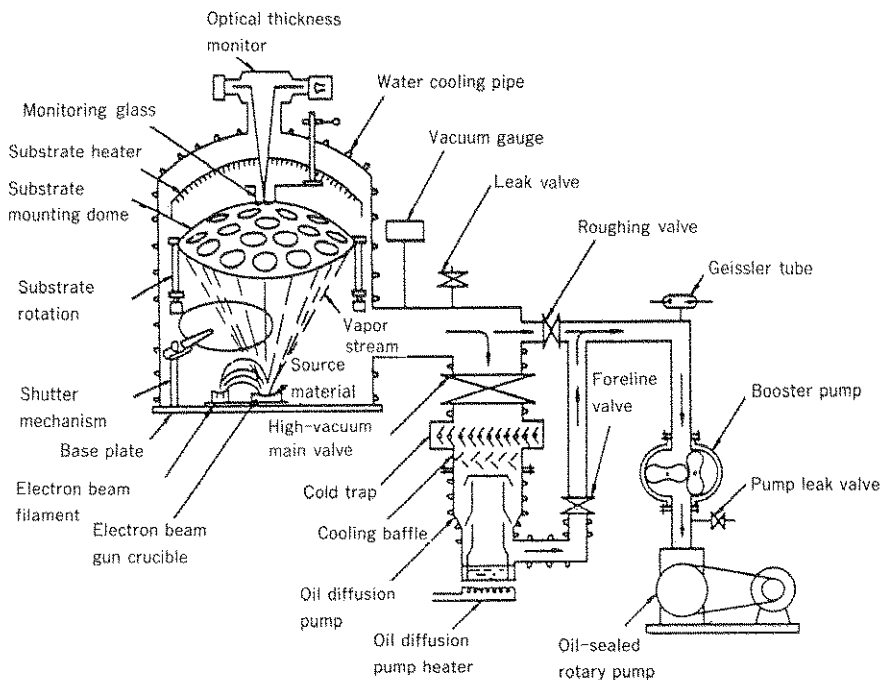


Fig. 6 Layout of pumping system of an evaporation plant.

または -120°C ～ -150°C 程度のコールドトラップを併用する場合が多い。最近の拡散ポンプの構造を Fig. 7 に示す。また Table 1 に排気速度を示す。

(2) クライオポンプ

Fig. 8 にクライオポンプの概念図を示す。このポンプは、パネルおよび活性炭を冷却し、気体を凝結、吸着することにより排気するポンプである。Table 2 にクライオポンプの排気速度を示す。このように H_2O の排気速度が大きい。一般に、 10^{-5} ～ 10^{-7} Torr 程度の高真空中に排気した時の残留ガスは、 H_2O が大部分を占めているのでクライオポンプは非常に有効である。また、プラスチック基板を用いる場合、真空中では H_2O を大量に放出するので、クライオポンプを使用する例が増えている。

る。

3.2 蒸発源

(1) 抵抗加熱

ワイヤー状やボート状に成形した高融点のフィラメント材料 (W, Mo, Ta など) に、直接通電加熱する方法で、 MgF_2 や SiO などの蒸発に使用されている。

(2) 電子銃

水冷するつばに入れた蒸発材料に、数 kV～数十 kV に加速された電子を当てることにより加熱蒸発させる方法である。ほとんどの物質を蒸発させることができ、るつばの点数を増すことにより、容易に多層膜を形成することができる。Fig. 9 に実際の装置に設置された電子銃を写真で示す。これは一台の成膜装置に 2 基の電子銃が設置された

Table 1 Pumping speed of oil diffusion pump,
(Air l/sec.)

HD-200 (8")	HD-250 (10")	HD-350 (14")	HD-450 (18")	HD-550 (22")	HD-700 (28")
1900	2900	5500	9200	13500	23000

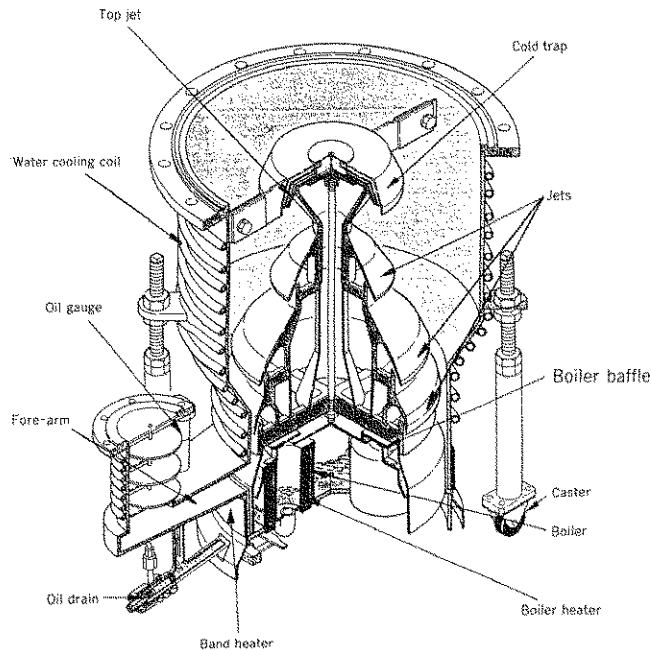


Fig. 7 Diagram of an oil diffusion pump.³⁾

例である。右側の電子銃のつばにはタブレット状の試料がセットされている。また左側の電子銃は、粒状の試料を自動供給機構により、つば上に追加できるようになっている。後述する連続式蒸着装置では、このように大量の試料があらかじめ成膜室にセットされている。Fig. 9の電子銃は、電子ビームを磁界で180°偏向して、つばに当てるタイプであるが、他に270°偏向のタイプも用いられている。

3.3 膜厚計

(1) 光学式モニター⁴⁾

すでにFig. 2に示したように、基板に薄膜を形成しながら、ある波長の光で、反射光量（または透過光量）を観察すると、光の干渉効果により、膜厚の増加にともなって周期的な変化を示す。光学薄膜の作成では、多くの場合、その光量変化が極値をとる膜厚になるように成膜しなければならない。これは、光学的膜厚が、観測波長の1/4の整数倍であることを意味する。この光学的膜厚を

知るのに、光学式モニターが用いられる。

光学式モニターの設置例をFig.10に示す。これは、反射二色式と呼ばれるシステムである。成膜中の基板を直接監視することは、光路調整が困難な点や、多層膜を成膜する場合に精度が悪くなるために行われない。観測用に別にモニターガラスを置き、この上に形成される膜をモニターしている。Fig.10の二色式のモニターでは、反射光を二つの異なった波長で観測できるようになっている。その光量変化をFig.11に示す。この時、二つの波長の光量（AとB）の差（A-B）の変化をFig.12に示す。この方法は、必要な膜厚の時、A-B光量が0となるように、二つの観測波長を選ぶことにより、成膜の自動化を容易にする。この例では、反射光量で観測しているが、透過光量で観測することもでき、必要に応じて使い分けられている。光学式モニターの設置された装置例をFig.13に示す。真空室の上に光路系が設置され、窓ガラスを介して、光は真空室内部のモニターガラスに導かれ、反射した光は再び窓ガラスを通り、測光部へ入る。ドーム状の基板ホルダーの上に多数ある筒がモニターガラスホルダーで、この中に一枚ずつモニターガラスがセットされている。ドームの中央部のモニターガラスは、基板と同じ高さまで下がるように設計されていて、これを観測に用いる。モニターガラスは順次交換して使用し、

Table 2 Pumping speed of cryo pump.
(l/sec.)

TMH-500 (20")		TM-250 (10")	
Air	H ₂ O	Air	H ₂ O
10000	30000	3000	9000

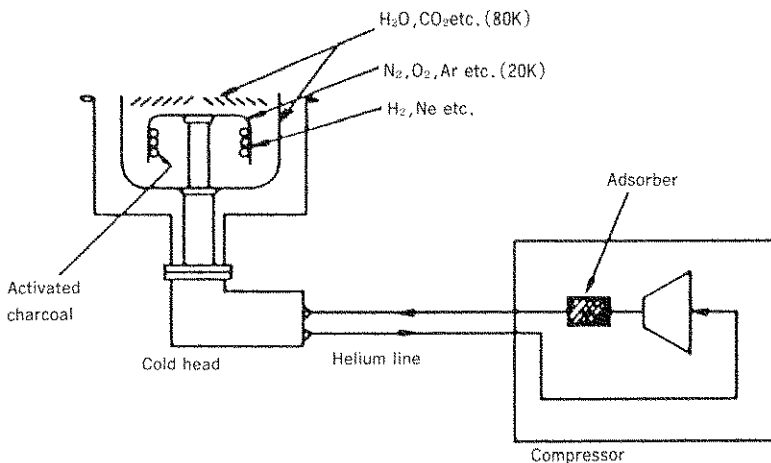


Fig. 8 Schematic cryopump array.

各層ごとに精密に膜厚制御することができる。これは、多層膜用パッチ式蒸着装置の例であるが、連続式蒸着装置では、基板と共にモニターガラスも外部から供給できるようになっている。観測波長を決める干渉フィルターも、自動的に交換できるようになっていて、複雑な構成の多層膜にも対応できるようになっている。

(2) 水晶式成膜コントローラー

光学式モニターは、光学的に必要な膜厚を知るのには適しているが、成膜中の刻々の膜厚の変化を正確に知るのは難しい。しかし、成膜速度が一

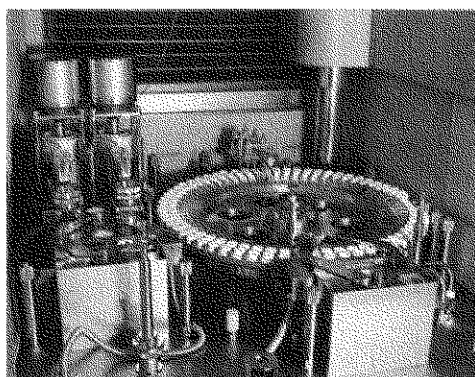


Fig. 9 Electron beam gun

定になるようにコントロールしないと、不均質な膜となり、求める光学特性が得られないことがある。そのため、成膜速度を一定にする手段として水晶式成膜コントローラーが使われている。このコントローラーは、水晶片の表面に膜が形成されると、発振周波数がさがることを利用し、この周波数の変化を膜厚や成膜速度に換算し、成膜中の蒸発源のパワーコントロールを行うものである。

3.4 ドーム回転機構

膜厚や膜質の均一化をはかるために基板を回転させる。公転が一般的であるが、必要に応じて自公転（遊星回転）させる場合がある。

3.5 膜厚分布補正

蒸発源と基板の間に、形を調整した遮蔽板を置き、基板を公転しながら成膜することにより、基板全面の膜厚を均一にすることができる。

3.6 基板加熱

基板が耐熱性のあるものであれば、加熱して成膜することにより付着力や膜特性を改善することができる。ニクロム線のシースヒーターやハロゲンランプヒーターが使用される。

3.7 ボンバード機構

成膜直前に、基板をグロー放電にさらすことにより表面の清浄化をはかり、膜の付着力を高める

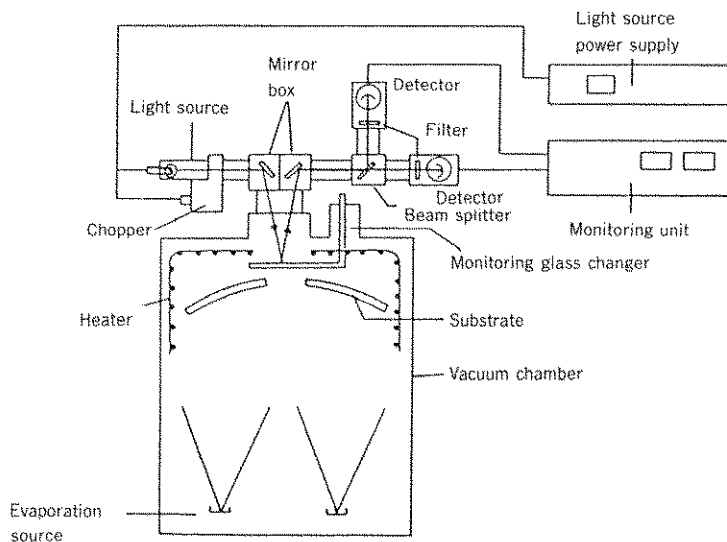


Fig. 10 A possible arrangement of a monitoring system for reflectance measurement.

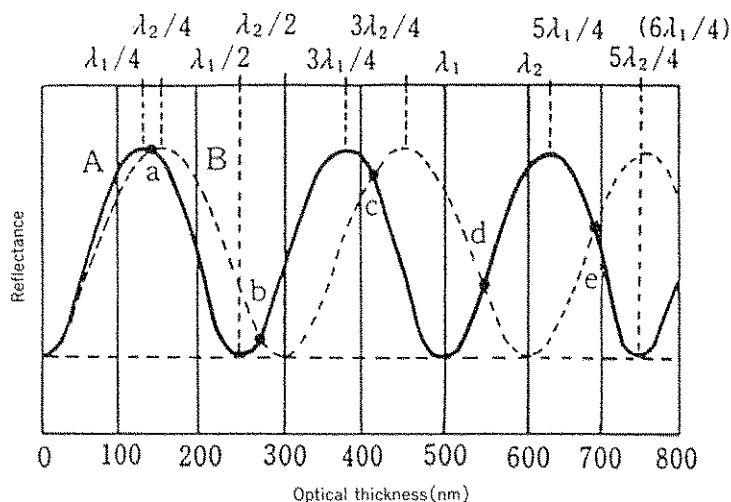


Fig. 11 The variation with thickness of the reflectance on a monitoring glass at two wavelengths (A and B).

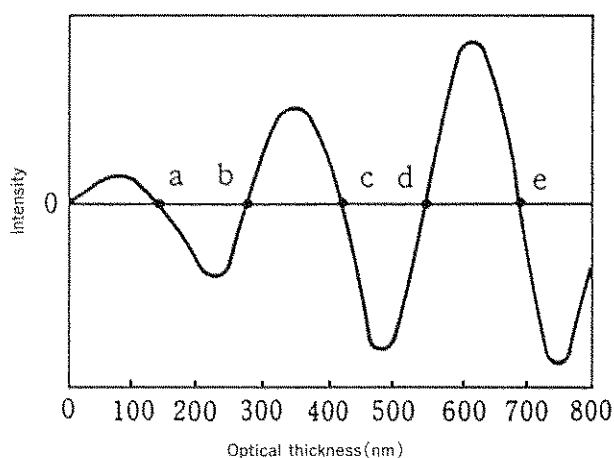


Fig. 12 The variation with thickness of the intensity of the difference between A and B.

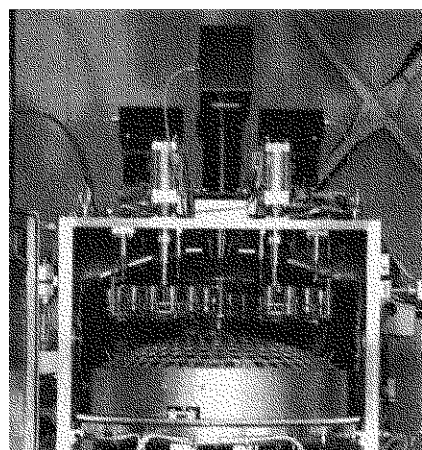


Fig. 13 The upper part of the chamber with an optical thickness monitor.

ことができる。電源は直流または高周波、導入ガスは Ar または大気一般的である。

3.8 ガス導入機構

ボンバードや成膜中、必要に応じてガスを導入する。一定流量のガスを流し続ける方法と、一定圧力を保つようにガス流量を可変する方法がある。

3.9 装置構成

次の二つに分けられ、生産量や膜の構成、特性

などに応じて使い分けられている。いずれの場合も、真空室は前扉式が主流である。

(1) バッチ式

基板セット→排気→成膜→リーク→基板取り出し、のサイクルを一つの真空室で行うものである。このタイプは、毎回、排気工程があるので、生産効率は良くない。したがって、生産量が少ない場合や、超多層膜のように、排気時間より成膜時間の方がはるかに長く、生産効率があまり低下しない

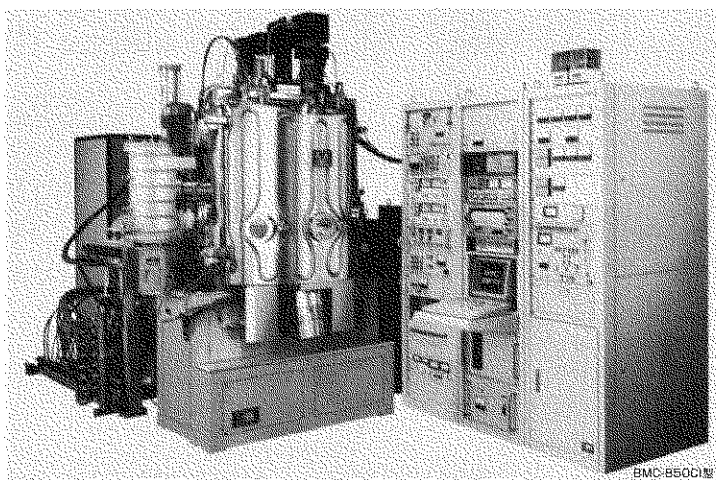


Fig. 14 Model BMC-850CI high vacuum coating system.⁵⁾

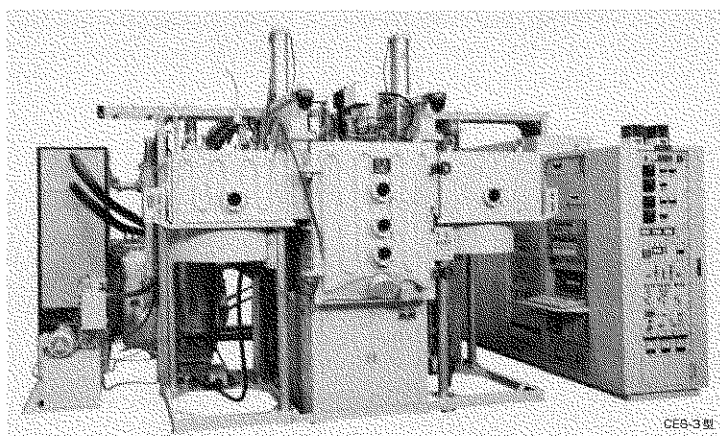


Fig. 15 Model CES-3 continuous type high vacuum coating system.⁶⁾

い場合に使用されている。Fig.14に、このタイプの外観を示す。

(2) 連続式

基板の供給室と取り出し室が別に設けられ、成膜室は、蒸発材料の補給時や清掃時以外、真空中に保つもので、生産効率が高い。眼鏡の反射防止膜などのように、重ね合わせる層数が少なく、成膜時間が短い場合は、このタイプを使う場合が多い。Fig.15にその外観を、Fig.16に基板移動の過程を示す、この場合は、成膜室が一室であるが、必要に応じて、数室の成膜室を連結する場合もあ

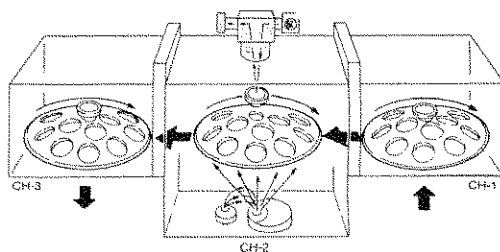


Fig. 16 Coating process of model CES-3.

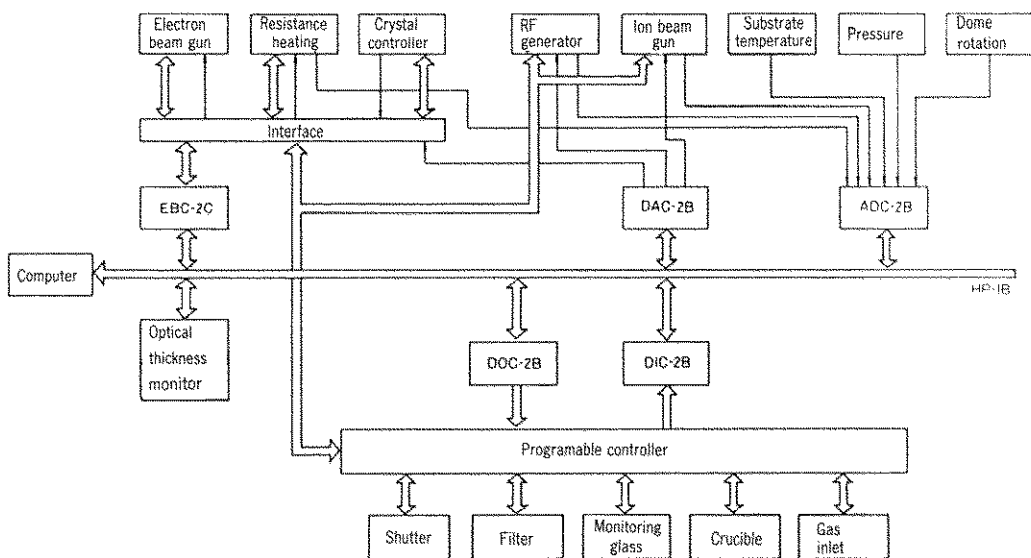


Fig. 17 Functional diagram of process control computer for high vacuum coating system.

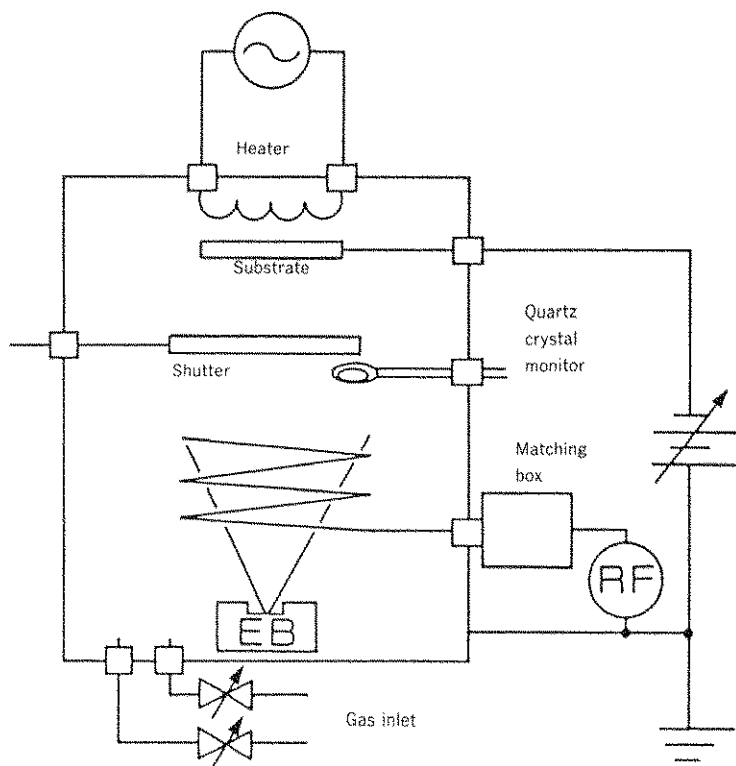


Fig. 18 Schematic diagram of a RF ion plating system.

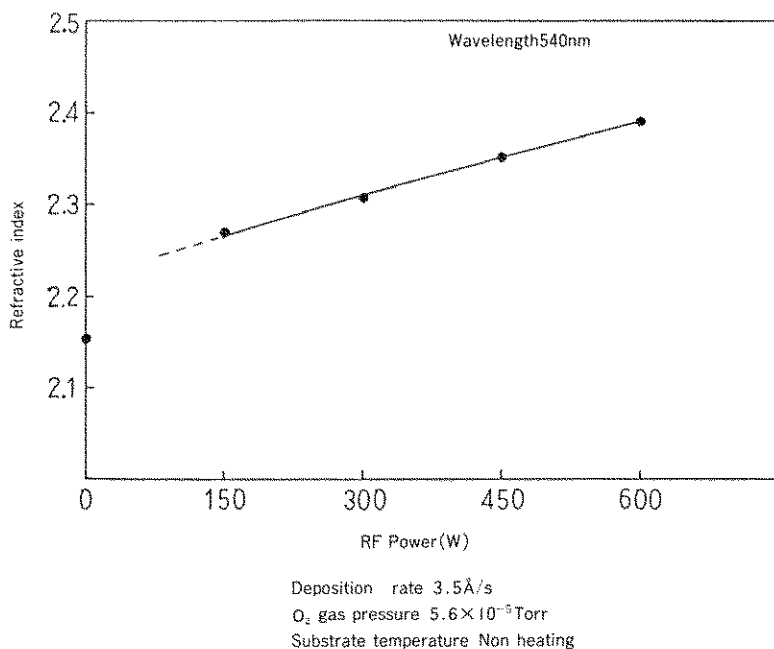


Fig. 19 Refractive index of the TiO_2 films by RF ion plating.

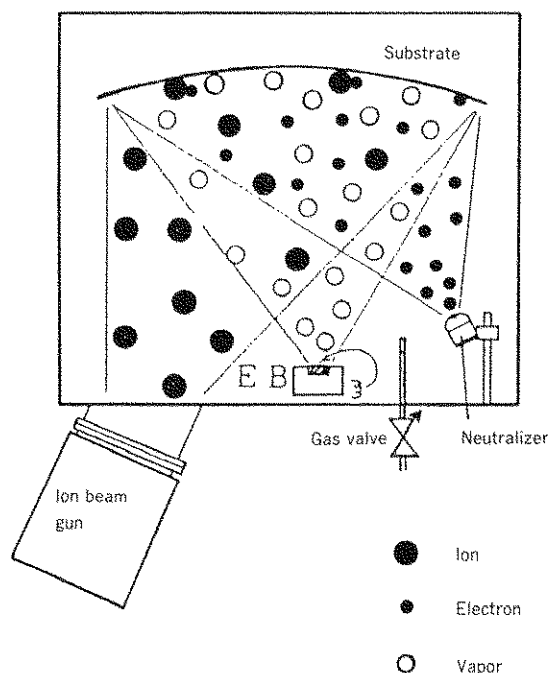


Fig. 20 Schematic diagram of a ion-beam assisted deposition system.



Fig. 21 Model KIS-80D ion gun⁹⁾

る。

3.10 薄膜作成装置の自動化

コンピュータの進歩、普及により、現在では自動蒸着システムを使用し、無人で成膜作業を行う例が増えてきた。特に、数十層以上の超多層膜の形成は、自動化しなければ不可能である。Fig.17

に、そのシステム機能図を示す。

4. 薄膜作成技術に関する最近の話題

4.1 イオンプレーティング法

蒸発物質の一部をイオン化して成膜する方法である。イオン化の方法には種々の方法があるが、光学薄膜の作成には、高周波法⁷⁾が多く利用されている。この方法は、13.56 MHz の RF 放電を用

いて、導入ガスおよび蒸発物質をイオン化する。Fig.18 に装置構成図を、Fig.19 に TiO_2 膜の例を示す。この成膜例から、高周波電力を大きくするにしたがって、膜の充てん密度が高くなり、屈折率が上昇することがわかる。

4.2 イオンビームアシスト蒸着⁸⁾

イオン銃により、基板表面にガスイオンを照射しながら成膜する方法で、最近、広く用いられは

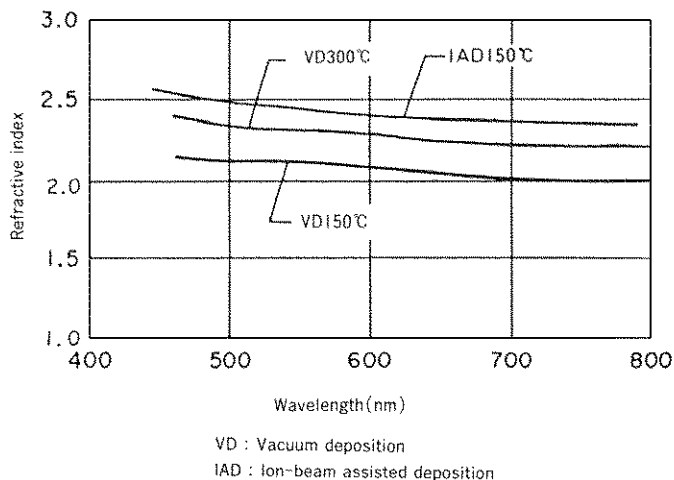


Fig. 22 Refractive index of the TiO_2 films by ion-beam assisted deposition.

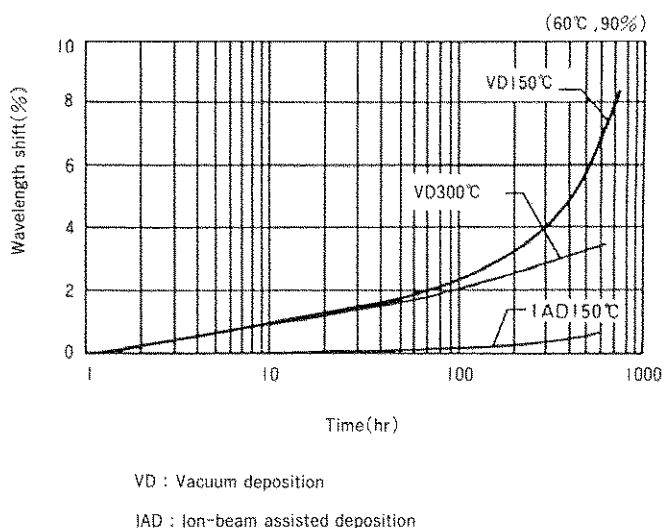


Fig. 23 Environmental test of the TiO_2 films by ion-beam assisted deposition.

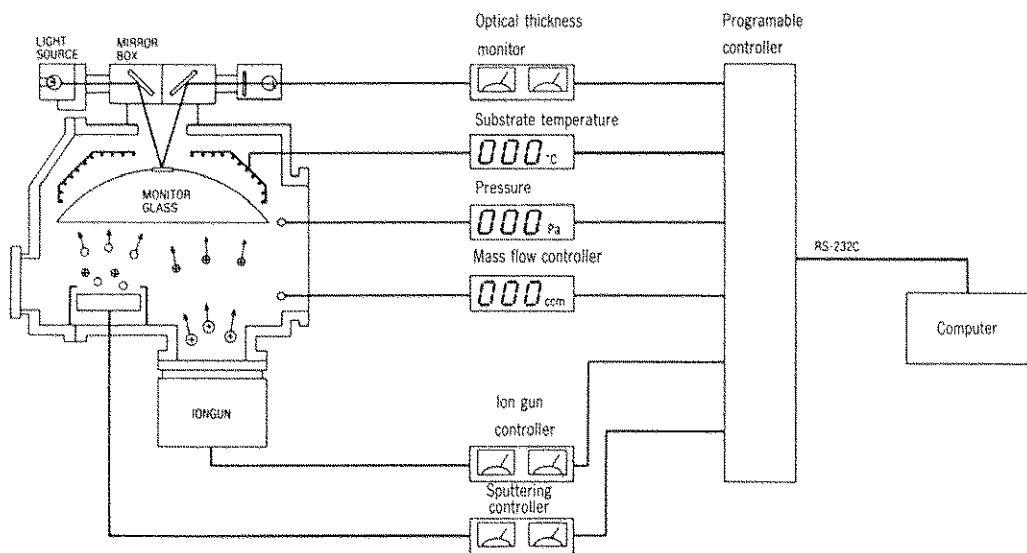


Fig. 24 Schematic diagram of a sputtering system for optical thin-film.¹⁰⁾



Fig. 25 Model BMS-6312 sputtering system for optical thin-film.¹⁰⁾

じめた。Fig.20 に、その原理図を、Fig.21 にイオン銃の外観を示す。また、Fig.14 の装置の前面下部には、イオン銃が設置されているのが見える。Fig.22 と Fig.23 には、TiO₂ 膜の例を示す。これによれば、低温で屈折率の高い膜が得られ、膜の経時変化も少ないことがわかる。

4.3 スパッタリング法

半導体関連分野の技術であったが、光学薄膜用としても使用されはじめた。Fig.24 にシステム構成図、Fig.25 に、その外観を示す。

5. おわりに

光学薄膜の用途は、従来の反射防止膜、反射増加膜から、エッジフィルター、帯域フィルター、コールドミラー、レーザーミラー、ビームスプリッターなどへ拡大している。また、利用する波長域も、可視光から、近紫外や近赤外、さらには、遠紫外や遠赤外へと広がり、要求される膜質も高性能なものとなってきた。そのニーズに応えるべく、新しい成膜技術が開発され、また、真空の質や成膜の制御技術においても高性能化が進んできた。今後も、その傾向はさらに進み、薄膜作成装置も、これらの技術に対応して、進歩を続けられると思われる。

参考文献

- 1) H. A. Macleod: Thin-Film Optical Filters, Second Edition, Adam Hilger Ltd., Bristol (1986)
〔日本語版〕小倉繁太郎, 中島右智, 矢部孝, 吉田国雄訳: 光学薄膜, 日刊工業新聞社 (1989)
- 2) 藤原史郎編, 石黒浩三, 池田英生, 横田英嗣: 光学薄膜, 共立出版 (1985)

- 3) 真空器械工業(株)カタログ：油拡散ポンプ
HD シリーズ (1980)
- 4) 大工原茂樹：表面技術, Vol.40, No.2,
pp.248-254 (1989)
- 5) 真空器械工業(株)カタログ：真空薄膜形成装
置 BMC シリーズ (1989)
- 6) 真空器械工業(株)カタログ：連続型薄膜形成
装置 CES-3 (1989)
- 7) 村山洋一, 松本政之, 柏木邦宏：応用物理,
Vol.43, No.7, pp.687-692 (1974)
- 8) 大工原茂樹：金属表面技術協会, 新素材ドラ
イプロセッシング専門部会, 第9回例会資料,
pp.1-11 (1988)
- 9) 真空器械工業(株)カタログ：イオン銃 (1988)
- 10) 真空器械工業(株)カタログ：ハイレートスパ
ッタリング装置 BMS/BSC (1988)

〔筆者紹介〕



大工原 茂樹 (だいくはら しげ
き)

昭和52年 東洋大学大学院工
学研究科修士課程修了
(電気工学専攻)

同 年 真空器械工業株式会
社入社, 以来, イオンプ
レーティング, イオン
ビームアシスト蒸着な
ど, イオンを利用した
蒸着技術の研究開発に
従事, 現在に至る。

現 在 同社 技術課 主任

Abstract

Optical thin-films such as antireflection films, high reflection films, edge filters, bandpass filters and beam splitters, are almost entirely manufactured by vacuum deposition process. The vacuum deposition plants consists of the vacuum chamber together with the necessary pumps, power supplies for supplying the energy necessary to evaporate the thin-film materials, monitoring equipment for measurement of the thin-film thickness during the process, substrate holding jigs, substrate rotation mechanism, substrate heaters and the process controllers. Modern plants for optical thin-film coating have the pumping process, the evaporation process and all pre-and post-deposition steps, all of these functions being computer controlled.

In recent years, there are some other ion-based methods of thin-film deposition such as ion plating, ion-assisted deposition and sputter deposition, may emerge as useful optical thin film deposition process.