

2007年度ETLプログラム

Prog 1 光学コーティング

ブロードバンド

誘電体多層膜ミラーの作成



米田研究室 引地 学

<概要>

電子ビーム蒸着器を用いて、ブロードバンド誘電体多層膜ミラーを作ります。果たして何色に見えるかな？

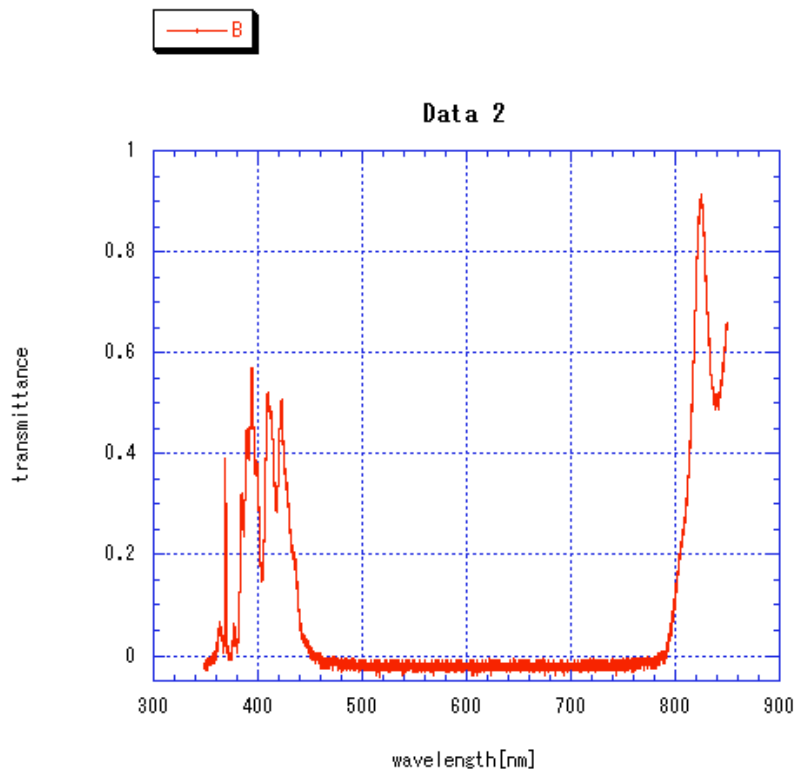


図 1．ブロードバンド誘電体多層膜ミラーの透過率スペクトル

<目的>

- (1) ミラーの種類や特徴を把握する。
- (2) 光干渉の物理を体感する。
- (3) 光の反射・透過とものの見え方の関係を学ぶ。

1. 主なミラーの種類と特徴

a. 金属ミラー



[1]

金属ミラーは、基板上に金属を積層したもので、最も一般的なミラーです。私たちが普段、至る所で使用している鏡もこの金属ミラーの1つです。この金属ミラーには、以下のような特徴があります。

- ・ 非常に広範囲な波長の光を反射することができる。
- ・ 金属自身の吸収が大きく、反射率は、通常90%程度。
- ・ ダメージに弱い。
- ・ 作成が容易で、比較的安価。

金属ミラーに用いられる代表的な金属材料には、以下のものがあります。

表1 主な金属材料の特徴[1][2]				
金属材料	高反射波長範囲	屈折率(n-ik)@650nm	蒸発温度(°C)	平均価格(円)※
Al(アルミニウム)	紫外～赤外	1.3-i7.11	1100～1300	3.00
Ag(銀)	青～赤外	0.07-i4.2	1000～1200	10.00
Au(金)	赤外	0.142-i3.374	1100～1300	12.00

※1 平均価格は、シグマ光機のカatalogを参考にしたので、この限りではありません。

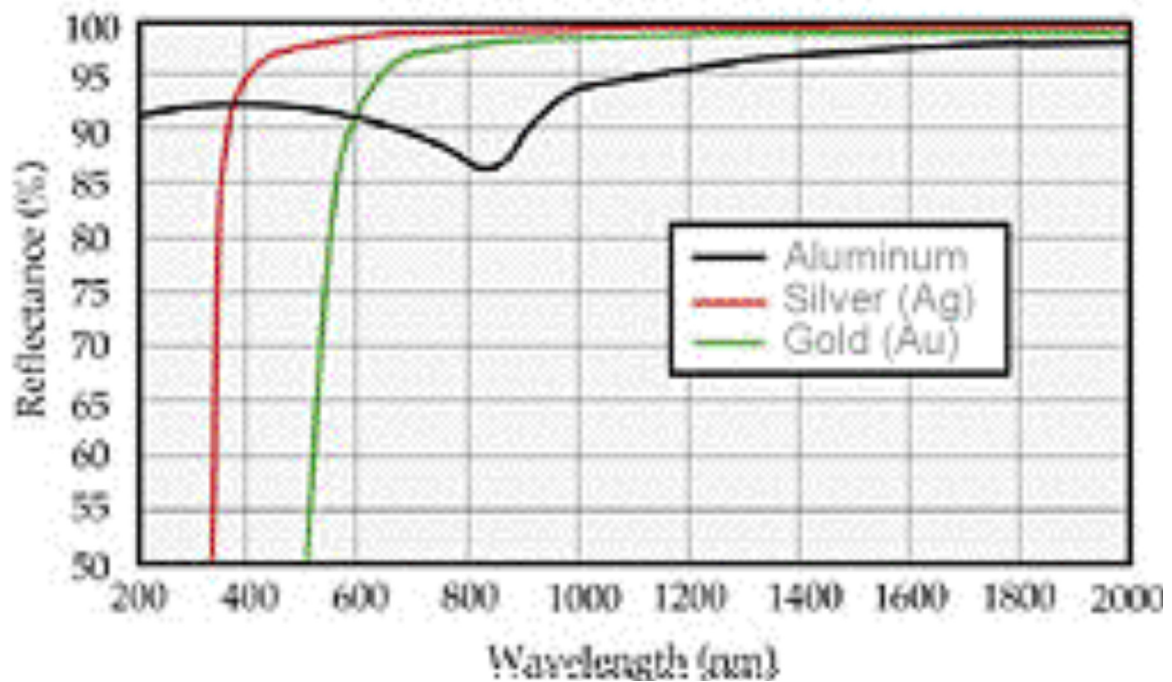
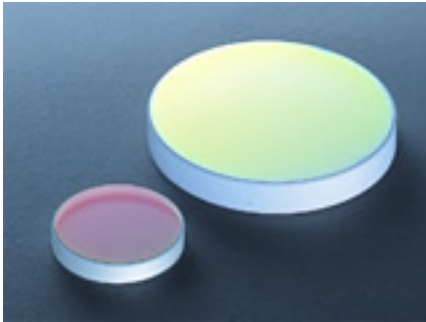


図2．主な金属材料の反射率スペクトル[3]

b. 誘電体多層膜ミラー



[1]

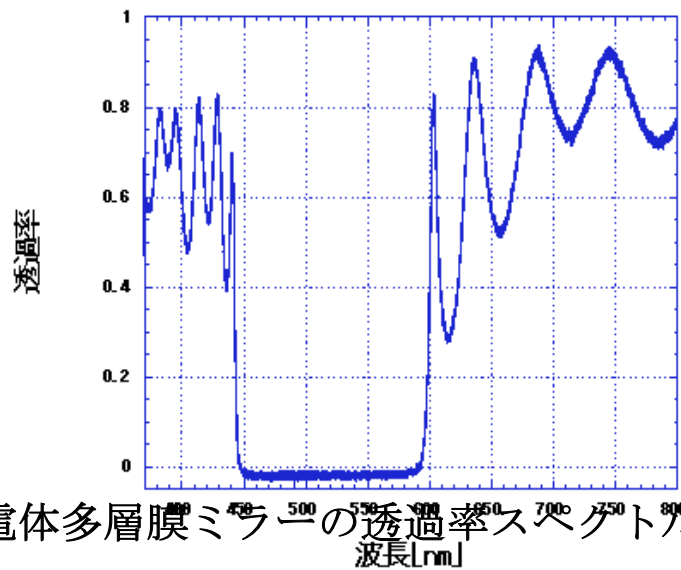


図 3. 誘電体多層膜ミラーの透過率スペクトル

誘電体多層膜ミラーは、基板上に誘電体を複数層にしたもので、光の干渉効果を利用したミラーです。この誘電体多層膜ミラーには、以下のような特徴があります。

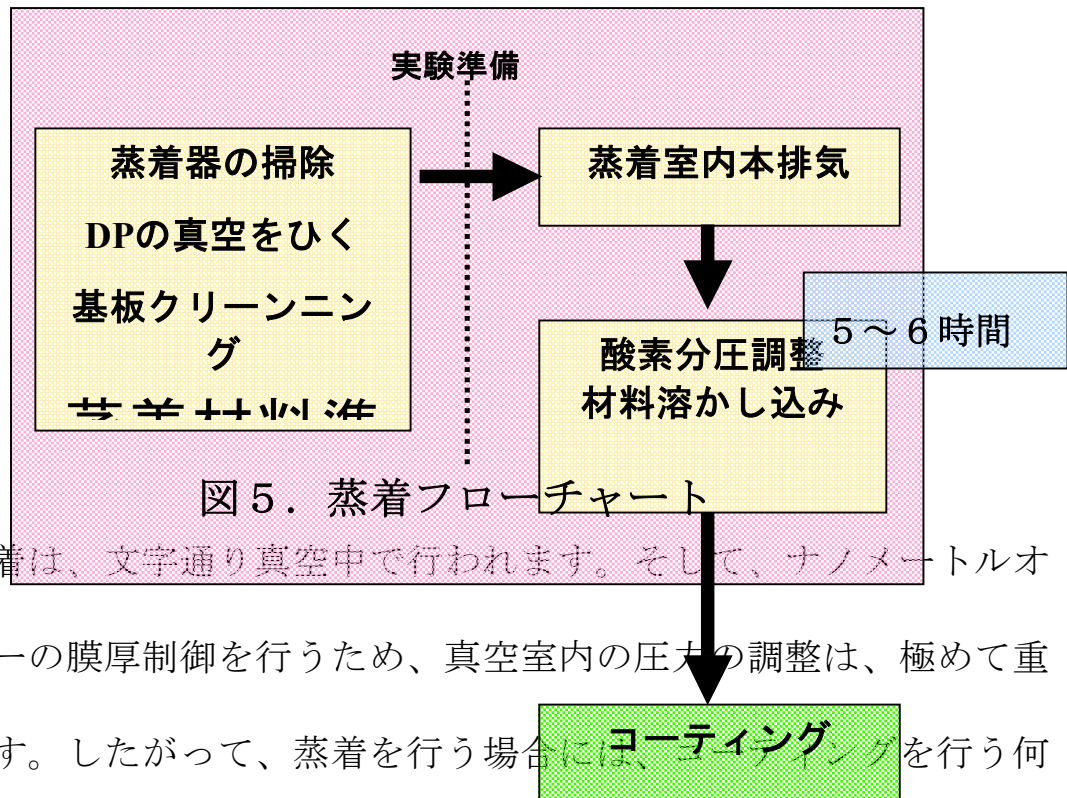
- ・ 波長選択性が大きく、波長ごとに反射と透過に分かれる。
- ・ 吸収が小さく、かなり反射率を高めることが可能。
- ・ ダメージに強い。
- ・ 作成が大変で、比較的高価。

2. 電子ビーム蒸着器と蒸着手順



図4. 電子ビーム蒸着器

図は、今回光学コーティングを行う電子ビーム蒸着器です。かなり大きな装置で、大型の油拡散ポンプを二機搭載しています。電子の運動エネルギーを熱エネルギーに変換して材料を加熱するため、酸化物やフッ化物といった誘電体の化合物を蒸着することが可能です。

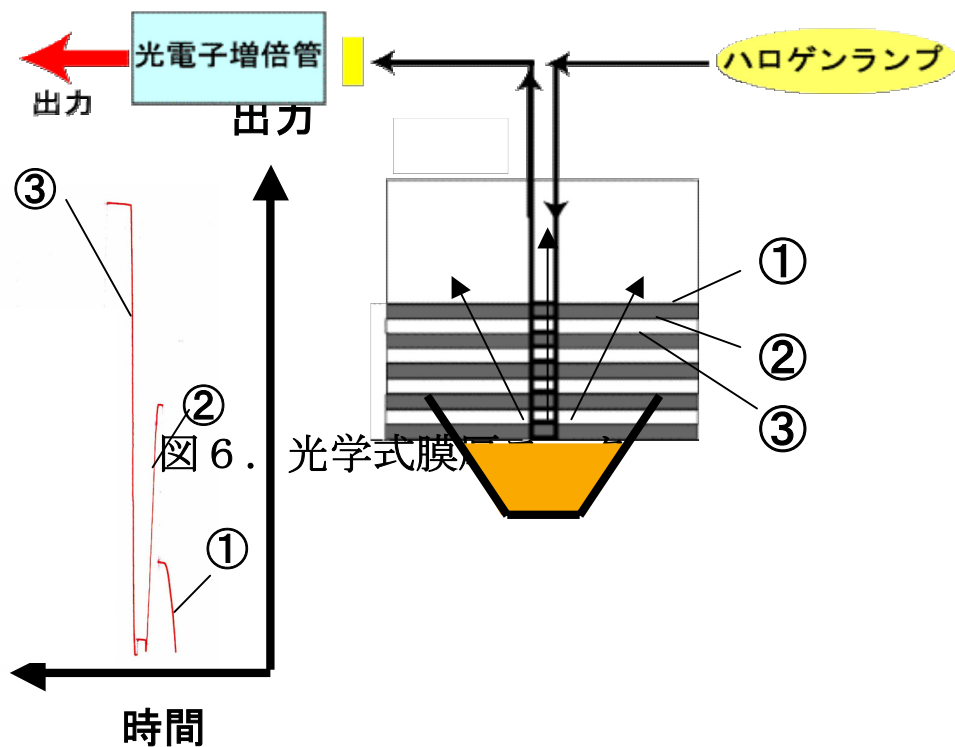


蒸着は、文字通り真空中で行われます。そして、ナノメートルオーダーの膜厚制御を行うため、真空室内の圧力の調整は、極めて重要です。したがって、蒸着を行う場合には、コーティングを行う何倍もの手間と時間を費やします。

膜厚モニタによる膜厚制御

みなさんに実際に行ってもらう、私のプログラムの中で最も重要な作業が、膜厚制御です。これに失敗すると、光の干渉条件は成り立たなくなります。具体的には、膜厚誤差は、 $\lambda/4$ の $1/10$ 、つまり、今回取り扱う可視の領域では、10nm 以下に抑えなければなりません。

このような髪の毛1本 ($= 100 \mu\text{m}$) の1万分の1のオーダーを制御するため、以下のような装置を使用します。



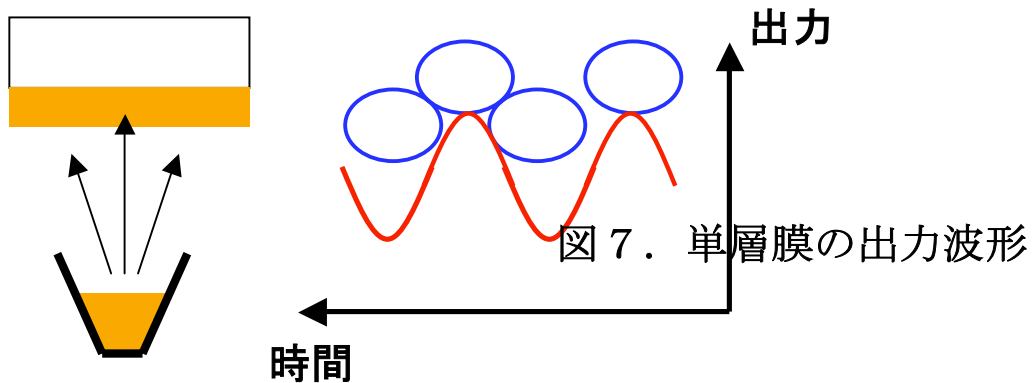
この装置は、光学式膜厚モニタと呼ばれる装置で、薄膜が基板に積層されていく様子をリアルタイムで観測することのできる装置です。このタイプは反射型で、薄膜が積層されることで変化する反射光の光強度を出力します。ディテクター（光電子増倍管）の前には干渉フィルターが置かれており、ある特定の波長のみが、透過するようになっています。

問題

図6で、①は基板上1層目の高屈折率層、③は低屈折率層を1層挟んだ、基板上3層目の高屈折率層です。

ディテクターの光出力が、③>①となっているのは、なぜでしょう？

また、図7のように、単層膜を成膜し続けると、光出力は正弦波となりますが、それぞれのピークは何を意味しているでしょう？



3. ものの見える方と反射

早速ですが、問題です。

問題

図8のような3枚のフィルターがあります。それぞれ、赤・青・緑

1つの色だけを透過するフィルターです。

さて、この3枚全て重ねたら何色に見えるでしょう？

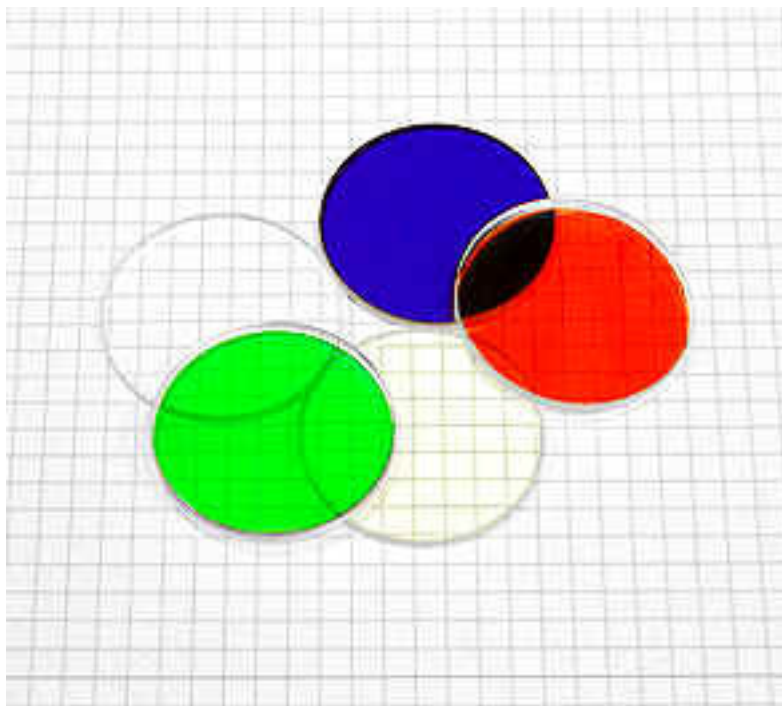


図8. 赤・青・緑三色のフィルター**[4]**

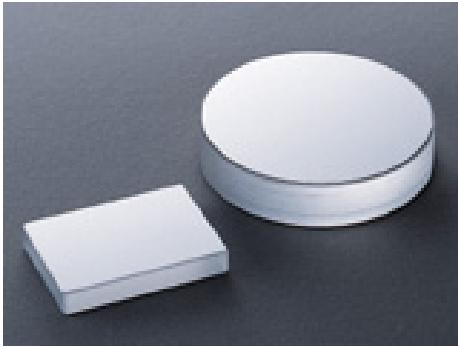
4. まとめ

では、最後にまた問題です。

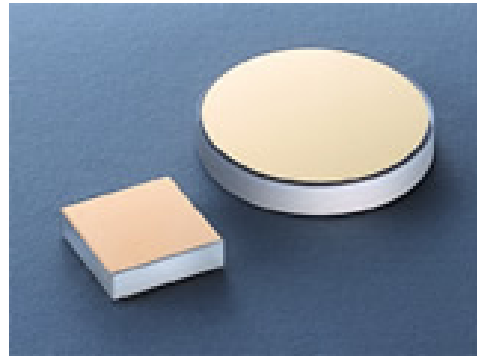
問題

金属はどうして金属それぞれの色をしているのでしょうか？

具体的に言えば、アルミはなぜ銀色をしているのでしょうか？金はなぜ金色をしているのでしょうか？



アルミミラー



金ミラー

答えは全て下のグラフに書いてあります。

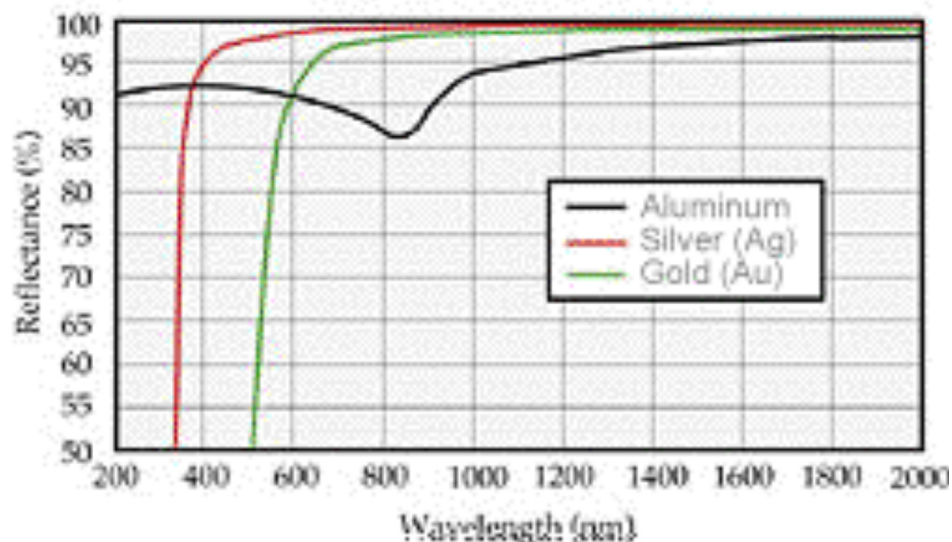


図 9 . 各種金属の反射率スペクトル[3]

つまり、どの波長の光を反射するかによって、ものの見え方は変わります。金属が一般に銀色をしているのは、可視の光（青・緑・赤）を全て反射しているからです。また、金が、いわゆる“金色”に見えるのは、800nm 以降の赤外線を強く反射するからです。

これから、みなさんは様々な種類のミラーを使用することになる
と思います。どの波長で、どのような用途で、光を反射させたいの
か、目的達成のためには、どんな材料を用いて、どんな種類のミラ
ーを選択すればよいのか。そうしたミラーの選択を、みなさん自身
でできるようになってくれば、私のE T Lは目標達成です。本当
に長時間お疲れ様でした。

これから始まるみなさんの研究生活が、充実したものとなるよう、
影ながら応援させていただきます。

私のE T Lを受講していただき、誠にありがとうございました。

ここからは、付録です。興味があれば参照してください。

1. 光の反射・透過・干渉

1-1. 屈折率とフレネル係数

1-1-1. 屈折率

まず、ここでは、屈折率というものを物理的に理解します。

中学・高校から頻出の屈折率。定義によると、『光の位相速度の物質中での値 c に対する真空中の値の比 c_0/c をその物質の屈折率という』（株式会社研究社 理化学英和辞典より）と書いてあります。あるいは、“媒質中の光の通りにくさ”と習ってきたかもしれません。ですが、どちらも物理的なイメージとしては、非常に捉えにくいと思います。

そこで、屈折率を以下のように解釈します。

図1は、同じ縮尺で縮小した2種類の誘電体結晶1 kgで、左が **Ta₂O₅**（屈折率 **n=2.0~2.3**）、右が **SiO₂**（屈折率 **n=1.4**）です。



図1. 2種類の誘電体結晶1 kgの体積比較。
左が **Ta₂O₅**（**n=2.0~2.3**）、右が **SiO₂**（**n=1.4**）で、体積に歴然の差がある。

二つの物質を比較すると、同じ **1 kg** でも体積が大きく異なり、密度の違いが解ります。そして、ここから明らかなように、屈折率とは、物質の密度と考えることができます。つまり、媒質内が密であれば、それだけ光は、その媒質内を通過しにくくなり、逆に疎の場合は、光が通りやすくなります。

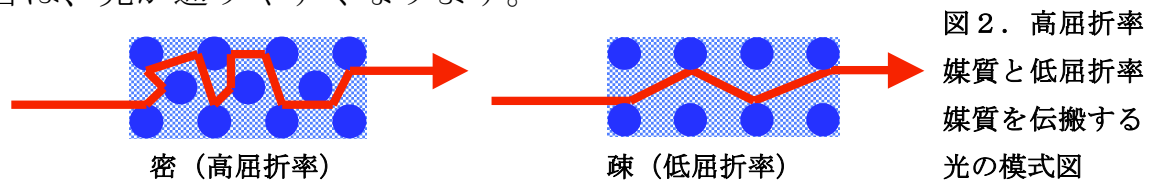


図2．高屈折率媒質と低屈折率媒質を伝搬する光の模式図

そのため、屈折率の異なる媒質中での光の速度（位相速度）は、その媒質の屈折率を用いて以下のように定義されます。

$$v = \frac{c}{n}$$

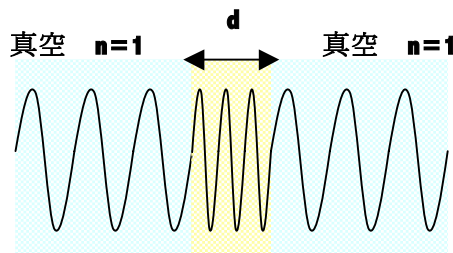


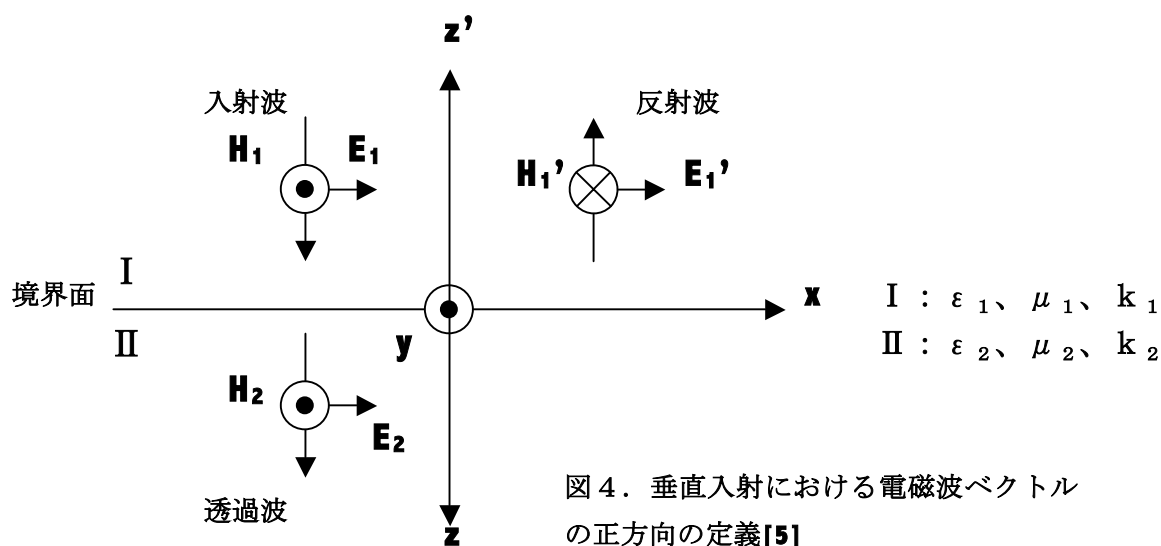
図3．屈折率 n の媒質における光の伝搬速度遅延の様子を表す模式

つまり、真空中（光の伝搬を遮る物質が何もない状態）を屈折率 $n=1$ とし、それと比べてその媒質中で光がどのくらい遅れるか（どのくらい密になっているか）という指標を表す定数が“屈折率”です。

そのため、屈折率 n 、厚み d （物理膜厚）の媒質中を通る光が実際に感じる距離は、媒質の厚みにその内部の通りにくさ（電気で言えば“抵抗”）を掛けた nd で考え、これを特に“光学膜厚”といいます。

1-1-2. フレネル係数の基礎

フレネル係数は、屈折率の異なる媒質の境界面に入射した電磁波が、その境界面でどのくらい反射、及び透過をするかを表す係数です。この係数は、二つの媒質の屈折率のみで表すことができ、物理的イメージも捉えやすく、計算も簡単です。今後、大変役に立つので、ぜひ覚えてください。



ここでは、議論を簡単にするため、入射光は平面波であり界面に垂直に入射する場合を考えます。また、光は電界 $\mathbf{E}$ と磁界 $\mathbf{H}$ が直交し、 z 方向に進行するものとして、界面におけるそれぞれの反射波や透過波の電界・磁界の向きを図4のように定義します。さらに、各物理量は、以下のように定めます。

媒質Ⅰ：誘電率 ε_1 ($= \varepsilon_{r1} \varepsilon_0$)、透磁率 μ_1 ($= \mu_{r1} \mu_0$)、

屈折率 n_1 、波数 k_1 、入射波の振幅 **A**、反射波の振幅 **A'**

媒質Ⅱ：誘電率 ε_2 ($= \varepsilon_{r2} \varepsilon_0$)、透磁率 μ_2 ($= \mu_{r2} \mu_0$)、

屈折率 n_2 、波数 k_2 、透過波の振幅 **B**

このとき、電解と磁界、それぞれの波動関数は、以下のようになります。

入射波

$$\text{電界;} E_1 = A \exp i(\omega t - k_1 z) \quad \text{磁界;} H_1 = \sqrt{\frac{\varepsilon_1}{\mu_1}} A \exp i(\omega t - k_1 z)$$

反射波

$$\text{電界;} E_1' = A' \exp i(\omega t - k_1 z') \quad \text{磁界;} H_1' = \sqrt{\frac{\varepsilon_1}{\mu_1}} A' \exp i(\omega t - k_1 z')$$

透過波

$$\text{電界;} E_2 = B \exp i(\omega t - k_2 z) \quad \text{磁界;} H_2 = \sqrt{\frac{\varepsilon_2}{\mu_2}} B \exp i(\omega t - k_2 z)$$

ここで、境界面 (**z=0, z'=0**) における電磁界の接線成分は等しく、

$$E_1(z=0) + E_1'(z'=0) = E_2 \Rightarrow A + A' = B - \textcircled{1}$$

$$H_1(z=0) + H_1'(z'=0) = H_2 \Rightarrow \sqrt{\frac{\varepsilon_1}{\mu_1}} A - \sqrt{\frac{\varepsilon_1}{\mu_1}} A' = \sqrt{\frac{\varepsilon_2}{\mu_2}} B - \textcircled{2}$$

となり、①②共に振幅のみの関係で表されます。

①②を用いて **B** を消去すると、

$$\frac{A'}{A} = \frac{\sqrt{\frac{\epsilon_1}{\mu_1}} - \sqrt{\frac{\epsilon_2}{\mu_2}}}{\sqrt{\frac{\epsilon_1}{\mu_1}} + \sqrt{\frac{\epsilon_2}{\mu_2}}} = \frac{\text{反射波の振幅}}{\text{入射波の振幅}}$$

一方、①②を用いて **A'** を消去すると、

$$\frac{B}{A} = \frac{2\sqrt{\frac{\epsilon_1}{\mu_1}}}{\sqrt{\frac{\epsilon_1}{\mu_1}} + \sqrt{\frac{\epsilon_2}{\mu_2}}} = \frac{\text{透過波の振幅}}{\text{入射波の振幅}}$$

となります。

ここで、誘電率と透磁率を真空の誘電率 ϵ_0 と透磁率 μ_0 、および比誘電率 ϵ_r と比透磁率 μ_r を用いて表すと、以下のようになり、光学薄膜で扱う誘電体の比透磁率は一般に $\mu_r = 1$ です。また、屈折率 **n** は媒質の比誘電率の平方根で表されます。

$$\left. \begin{aligned} \epsilon_1 &= \epsilon_{r1}\epsilon_0, & \epsilon_2 &= \epsilon_{r2}\epsilon_0 \\ \mu_1 &= \mu_{r1}\mu_0, & \mu_2 &= \mu_{r2}\mu_0 \Rightarrow \mu_1 = \mu_2 = \mu_0 \\ n &= \sqrt{\epsilon_r} \end{aligned} \right\} \textcircled{3}$$

③を用いると、それぞれ以下ようになります。

$$\frac{A'}{A} = \frac{\sqrt{\frac{\epsilon_1}{\mu_1}} - \sqrt{\frac{\epsilon_2}{\mu_2}}}{\sqrt{\frac{\epsilon_1}{\mu_1}} + \sqrt{\frac{\epsilon_2}{\mu_2}}} = \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} = \rho ; \text{フレネルの振幅反射係数}$$

$$\frac{B}{A} = \frac{2\sqrt{\frac{\epsilon_1}{\mu_1}}}{\sqrt{\frac{\epsilon_1}{\mu_1}} + \sqrt{\frac{\epsilon_2}{\mu_2}}} = \frac{2n_1}{n_1 + n_2} = \tau ; \text{フレネルの振幅透過係数}$$

ここで、通常用いている“反射率 **R**”や“透過率 **T**”は、電磁波のエネルギーに対して定義されるので、以下ようになります。

$$R = |\rho|^2 = \left(\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right)^2, \quad T = \frac{n_2}{n_1} |\tau|^2 = \frac{4n_1 n_2}{(n_1 + n_2)^2}$$

$$R + T = 1$$

このように、屈折率の異なる2つの媒質の境界面における電磁波の反射と透過は、その媒質の屈折率のみを用いて極めて簡単な形で表されます。例えば、窓ガラス等を見ると、わずかに反射が確認されますが、これは **4%**の表面反射に相当します（ガラス**(BK7)**の屈折率は可視光の領域で **n=1.5**）。

最後にフレネル反射係数 ρ の符号について確認します。

まず、 $\rho > 0$ ($n_1 > n_2$)、つまり、密度が密な物質から疎な物質に光が入射する場合、反射波の位相は入射波と同じになります。一方、 $\rho < 0$ ($n_1 < n_2$)、つまり疎から密の場合、反射波の位相は入射波に対して π だけずれます。

1-1-3. フレネル係数の応用

1-1-2で述べたフレネル係数は、光が媒質に対して垂直に入射し、かつ媒質内に吸収はなく、媒質の厚み（物理厚み）も光の波長に比べて十分厚い場合の議論でした。しかし、実際には光が斜めから入射する場合や媒質に吸収がある場合、媒質の厚みが光の波長程度の場合、それぞれによってフレネル係数は、変化します。そこで、ここからは様々な状況に対してフレネル係数を応用できるよう、それぞれケース別にポイントをまとめていきたいと思います。

a. 斜入射

ここでは、光が媒質に斜めから入射する場合に応用します。

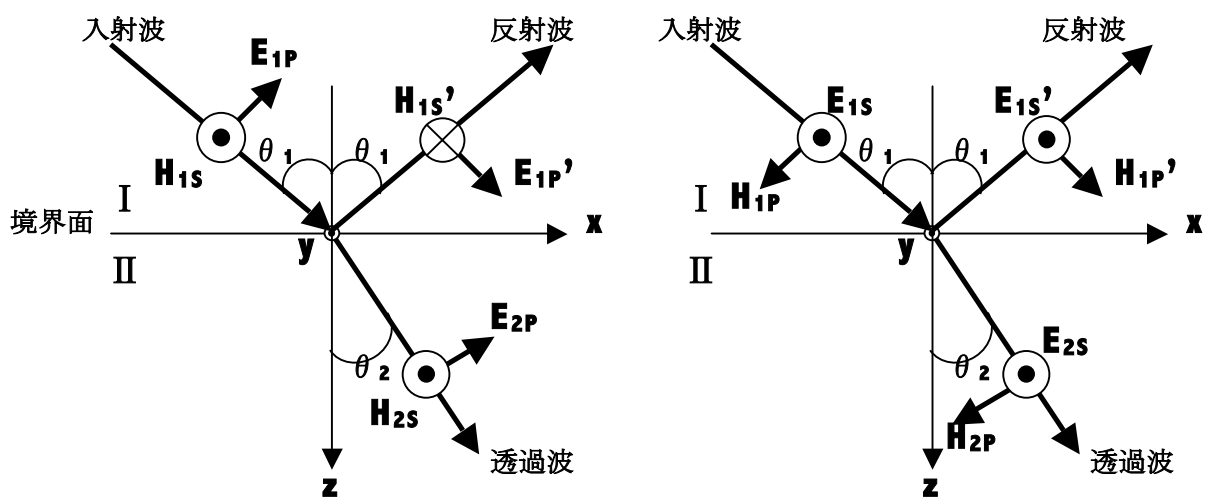


図5. 斜入射における電磁波ベクトルの正方向の定義[5]

光が媒質に斜めから入射する場合、入射面に対して平行な方向に振動する p 波と垂直な方向に振動する s 波を区別して考える必要があります。しかし、どちらもフレネル係数は、垂直入射時のフレネル係数に角度依存性を付加するだけで、簡単に表すことができます。

s 波

$$\rho_s = \frac{n_1 \cos \theta_1 - n_2 \cos \theta_2}{n_1 \cos \theta_1 + n_2 \cos \theta_2} = \frac{\eta_{1s} - \eta_{2s}}{\eta_{1s} + \eta_{2s}}, \quad \tau_s = \frac{2n_1 \cos \theta_1}{n_1 \cos \theta_1 + n_2 \cos \theta_2} = \frac{2\eta_{1s}}{\eta_{1s} + \eta_{2s}}$$

$$R_s = |\rho_s|^2, \quad T_s = \frac{\eta_{2s}}{\eta_{1s}} |\tau_s|^2$$

p 波

$$\rho_p = \frac{\frac{n_1}{\cos \theta_1} - \frac{n_2}{\cos \theta_2}}{\frac{n_1}{\cos \theta_1} + \frac{n_2}{\cos \theta_2}} = \frac{\eta_{1p} - \eta_{2p}}{\eta_{1p} + \eta_{2p}}, \quad \tau_p = \frac{\frac{2n_1}{\cos \theta_1}}{\frac{n_1}{\cos \theta_1} + \frac{n_2}{\cos \theta_2}} = \frac{2\eta_{1p}}{\eta_{1p} + \eta_{2p}}$$

つまり、斜入射の場合のフレネル係数は、s 波、p 波それぞれに対して、垂直入射における媒質の屈折率 n_j ($j=1,2$) を以下のように置き換えるだけで対応することができます。

$$\begin{aligned} \text{s 波} : n_j &\rightarrow \eta_{js} = n_j \cos \theta_j \\ \text{p 波} : n_j &\rightarrow \eta_{jp} = \frac{n_j}{\cos \theta_j} \\ (j &= 1, 2) \end{aligned}$$

b. 吸収媒質

次に、光が吸収媒質に入射する場合に応用します。

吸収媒質における屈折率は、複素屈折率 $\mathbf{N}$ を用いて以下のように表されます。

$$N = n - ik = \frac{c}{v}$$

ここで、 $\mathbf{n}$ は通常の屈折率、 $\mathbf{k}$ は消衰係数といい、媒質の吸収を表します。また、 $\mathbf{c}$ は真空中の光速、 $\mathbf{v}$ は媒質中の光の伝搬速度（位相速度）です。

したがって、この場合のフレネル係数は、垂直入射における媒質の屈折率 $\mathbf{n_j}$ ($\mathbf{j=1,2}$) を以下のように複素屈折率で置き換えることで、応用することができます。

$$n_j \rightarrow N_j = n_j - ik_j \\ (j = 1, 2)$$

c. 薄膜 ($d \div \lambda$)

最後に、光が薄膜に入射する場合に応用します。

媒質の厚みが波長程度の場合、多重反射による光の干渉効果を考える必要があります。

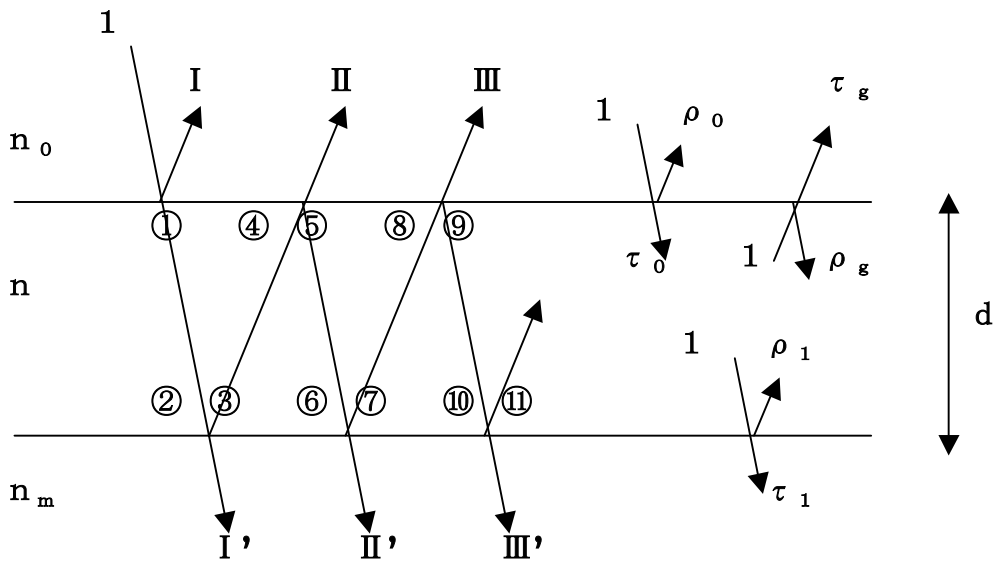


図 6. 薄膜における光の多重反射

$$\rho_0 = \frac{n_0 - n}{n_0 + n}, \tau_0 = \frac{2n_0}{n_0 + n}$$

$$\rho_1 = \frac{n - n_m}{n + n_m}, \tau_1 = \frac{2n}{n + n_m}$$

$$\rho_g = \frac{n - n_0}{n + n_0} = -\rho_0, \tau_g = \frac{2n}{n + n_0}$$

つまり、薄膜のフレネル係数は、以下のようになります。

$$\rho = I + (\text{監}) + (\text{企}) + (\text{協}) + \dots$$

$$\tau = I' + (\text{監})' + (\text{企})' + (\text{協})' + \dots$$

ここで、

$$\textcircled{1} ; \tau_0$$

$$\textcircled{2} ; \tau_0 \times e^{-i\delta}$$

$$\textcircled{3} ; \tau_0 e^{-i\delta} \times \rho_1$$

$$\textcircled{4} ; \tau_0 \rho_1 e^{-i\delta} \times e^{-i\delta}$$

$$\textcircled{5} ; \tau_0 \rho_1 e^{-i2\delta} \times \rho_g = \tau_0 \rho_1 (-\rho_0) e^{-i2\delta}$$

$$\textcircled{6} ; \tau_0 \rho_1 (-\rho_0) e^{-i2\delta} \times e^{-i\delta} = \tau_0 \rho_1 (-\rho_0) e^{-i3\delta}$$

$$\textcircled{7}$$

$$\textcircled{8}$$

$$\vdots$$

となります。なお、 $\exp(-i\delta)$ は、屈折率 $\mathbf{n}$ の媒質に入射した光が、厚み $\mathbf{d}$ のところ ($\mathbf{n}_m$ との境界面) に到達するまでに生じる位相差を表しています。

さて、以上を踏まえて計算すると、以下ようになります。

$$\rho = \frac{\rho_0 + \rho_1 e^{-i2\delta}}{1 + \rho_0 \rho_1 e^{-i2}}, \tau = \frac{\tau_0 \tau_1 e^{-i\delta}}{1 + \rho_0 \rho_1 e^{-i2}}$$

$$R = |\rho|^2 = \frac{\rho_0^2 + \rho_1^2 + 2\rho_0 \rho_1 \cos 2\delta}{1 + (\rho_0 \rho_1)^2 + 2\rho_0 \rho_1 \cos 2\delta}$$

$$T = \frac{n_m}{n_0} |\tau|^2 = \frac{n_m}{n_0} \cdot \frac{(\tau_0 \tau_1)^2}{1 + (\rho_0 \rho_1)^2 + 2\rho_0 \rho_1 \cos 2\delta}$$

そして、このとき確かに **R+T=1** になります。

ここで、注目すべきは、位相差 δ が **$m\pi/2 (m=1,2,3,...)$** と **$l\pi (l=1,2,3,...)$** になるときです。これを図で表すと、それぞれ以下のようになります。

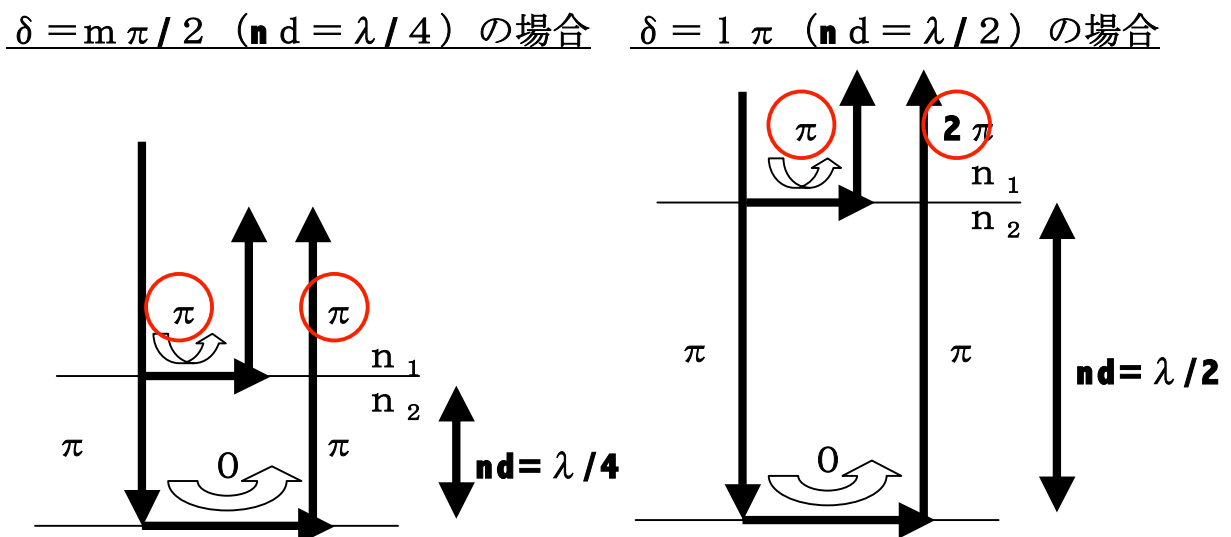


図7．薄膜における光の干渉

図7を見ると、位相差 δ が $m\pi/2$ ($m=1,2,3,\dots$) の場合には、 n_1 界面で反射した光の位相と n_2 界面で反射して n_1 へ透過してきた光の位相が一致していることがわかります。したがって、この場合、二つの波は互いに干渉し、強め合います。一方、 δ が $l\pi$ ($l=1,2,3,\dots$) の場合は、それら二つの位相が反転しており、二つの波は弱め合います。ここで、 $\delta = 2\pi d/\lambda$ ですので、薄膜に入射した光が強め合う、あるいは弱め合う時の薄膜の厚みは、それぞれ以下のようになります。

$$\begin{aligned} \text{強め合う時} : nd &= \frac{\lambda}{4} \\ \text{弱め合う時} : nd &= \frac{\lambda}{2} \end{aligned}$$

この二つの膜厚は、今後光学コーティングを議論していく中で、最も重要なパラメータになりますので、ぜひ頭に留めておいてください。

1－2．誘電体多層膜ミラー

ここでは、これまで述べてきたフレネル係数の応用として、光の干渉効果を利用した最もポピュラーな素子である、誘電体多層膜ミラーの原理について簡単に述べます。

1－1－3．cの薄膜のセクションにおいて、膜厚を波長程度に制御すると、光は、互いに干渉し、強めあったり、弱めあったりすることを述べましたが、誘電体多層膜ミラーの場合は、干渉効果の強め合いを利用した光学素子です。このミラーの特徴は、セクション1で述べたように、干渉効果を利用しているため、層数を重ねていくことで、かなり高い反射率（例えば、**R=99.9999%**）が得られるということです。その構造は、以下のようにになっています。

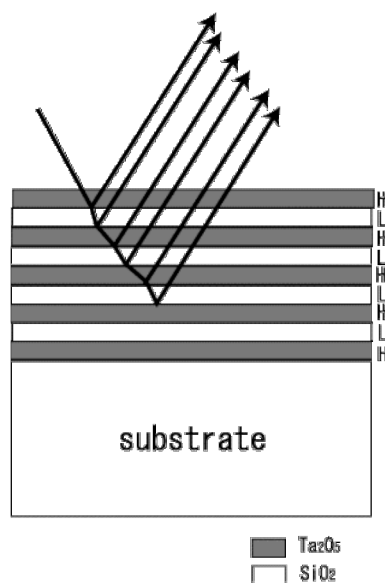


図8．誘電体多層膜ミラーの
模式図

図8のように、誘電体多層膜ミラーは、高屈折率と低屈折率の層を光学膜厚（ nd ）で、 $\lambda/4$ ずつ積層させた構造をしており、それぞれの層の境界面で波長 λ の光だけが干渉し、強め合っていくような構造をしています。そのため、セクション1で述べたように、波長選択性を持ったミラーとなります。

誘電体薄膜を用いた光学素子は、誘電体多層膜ミラー以外にもたくさんあります。これから、至るところで使用するようになると思いますが、全てに共通するのは、“光の干渉効果”を利用しているということです。

参考文献

- [1] シグマ光機 総合カタログ 8
- [2] 李正中 著、(株) アルバック 訳「光学薄膜と成膜技術」、ア
グネ技術センター
- [3] 西岡一、電気通信大学大学院講義「光計測特論」配布資料、**2006**.
- [4] http://www.sbig.com/large_format/filterchart_large.htm
- [5] 小檜山光信 著、「光学薄膜の基礎理論—フレネル係数、特性マ
トリクス」、(株) オプトロニクス