

# 5

## コーティングの特性



光学コーティング	5.2
光の反射	5.3
単層の減反射コーティング	5.7
多層の減反射コーティング	5.11
高反射コーティング	5.13
薄膜の生成	5.17
減反射コーティング	5.20
高反射コーティング	5.29

# 光学コーティング

Optical Coatings

現在使われている全ての光学部品の大半は、種々の材質のガラス製品です。また、大半の光学部品には、光学部品の表面の反射 / 透過特性を変えるために、その基板とは異なる組成の薄膜コーティングが施されています。

屈折率などの光学特性が互いに異なる2つの媒質の境界面に光が入射する度に、入射光の一部が反射され一部が透過します。反射光と透過光の強度比は、2つの媒質の屈折率差と入射角度に依存します。無コート光学ガラス表面での反射光強度は、通常のガラスで入射光強度の4~5パーセントです。何枚かの組み合わせレンズ系では、無コートの場合には入射光の反射損失が相当大きくなります。この場合、像のコントラストが悪くなったり、レンズによる本来の像に強度の弱い「ゴースト」像が重なったりします。しかし、「ゴースト」像自体は、本来の像面から十分デフォーカスしている場合が多く、このときにはコントラスト低下の効果のみが問題になります。

透過光学系では光学部品の反射ロスがゼロに近く、反射用光学部品では100%の反射率が、部分反射光学部品では所定の分岐比であることが必要条件です。無コートの光学部品で差し支えないのは、高々数枚の表面よりなる透過光学系で、少々の反射ロスが許される場合だけです。

通常は、必要とする反射 / 透過比を実現するために、光学部品の表面に色々な材質の薄膜を付けます。しかし、金属コートの場合を除いて、光学部品の反射 / 透過比は基板材料に依存します。もちろん、波長や入射角にも依存します。また、垂直入射でない場合は、この比は偏光方向に依存します。多層膜コーティングでは、波長や入射角といった数種の条件のもとで最適化がなされます。CVIメレスグリオの精密光学部品は、世界のユーザーに広く愛用されており、これは、当社の長年にわたり蓄積された薄膜コーティング技術でお客様のニーズにお応えしてきた結果と、自負しております。CVIメレスグリオは、世界各国と日本国内に光学設計、製造、およびコーティング部門を有し、カタログ製品や特注の光学部品を大量にコーティングできるだけでなく、お客様の特別な仕様にもお応えできるコーティングの設計・評価能力を備えております。

CVIメレスグリオは、コーティング能力を増強しましたので、特注品でもOEMのご注文でも、担当者が技術的およびコスト的なご相談を承りますので、お気軽にご相談ください。

最近の誘電体コーティングは、極めて硬く耐久性に優れています。適切な手入れと取り扱いで、何年もお使いいただけます。屈折率の高いヤケ易いガラスに減反射コートすれば、表面保護に役立ちます。コーティングの耐久性には、幾つかのファクターが関係します。コーティング設計では、総膜厚をできるだけ小

さくして膜内の機械的応力を小さくすること、なるだけ弾性の高いコーティング材料を用いること、被膜生成の工程では、粒状にならず均質で高品質の被膜が得られるよう細心の注意を払うこと、等が肝要です。CVIメレスグリオは、コート付き光学部品についてのお客様の取り扱いの良し悪しまでは目が届きませんが、上記の点を留意してできるだけ耐久性の高いコーティング被膜の製造に努力しています。

CVIメレスグリオの光学コーティング部門は、種々のタイプの誘電体膜および金属膜コーティングの設計と製造に関する長年の経験を有します。現在でも薄膜技術は急速に発展していますので、CVIメレスグリオは、新しい技術を注視しながらそれを取り込んで、常に最先端のコーティングをお客様に提供しています。

CVIメレスグリオが現在提供しているコーティングとしては、減反射、金属反射、誘電体反射、ハイブリッド反射、および部分反射(ビームスプリッター)コーティング、それに、単波長用、ダイクロイックまたは広帯域用のフィルターのコーティング等があります。

上記のうちの大抵のコーティングはこのカタログに記載の光学部品に施すことができますが、或るコーティングは特定の範囲の光学部品のみ限定され、また、或る別のコーティングは、キューブビームスプリッターのように、特定の光学製品としてのみ供給されます。

深紫外に最適化されたLeyboldのSYRUSpro 1100™を含む新規で拡充されたコーティング能力により、CVIメレスグリオは高品質なコーティングを提供しています。特別な要求やOEMのご注文に関しては、お気軽にCVIメレスグリオまでお問合せください。



SYRUSpro™ コーター

# 光の反射

The Reflection of Light

光が2つの異なる媒質の境界面に入射すると、一部は反射し、一部は2番目の媒質に(屈折して)透過します。反射光の方向、位相および相対強度は、幾つかの物理法則で規定されます。ここでは、研磨された光学表面での反射のみを考え、粗面での拡散反射は取り扱いません。

反射の法則によれば、入射角と反射角は同じです。単純な空気 / ガラス境界面での反射を表した図 5.1に、この様子を示します。入射光と反射光は、境界面の法線に対して同じ角度をなします。

## 反射強度

2つの誘電体媒質の境界面での反射光の強度は、2つの媒質の屈折率の比と入射光の偏光状態と入射角度に依存します。

光が境界面に垂直に入射する場合、入射光の振幅に対する反射光の相対振幅は、次式で与えられます。

$$\frac{(1 - p)}{(1 + p)} \quad (5.1)$$

ここで、pは2つの媒質の屈折率の比( $n_1/n_2$ )です。相対強度は、上式の2乗で与えられます。

2つの媒質の屈折率の違いが大きいほど、反射率が大きくなります。1.5の屈折率のガラスの空気 / ガラス界面での反射強度は、入射光の4 %ほどです。このような境界面を10枚含む光学系の透過ビームは、反射ロスにより入射光の66 %に減衰します。

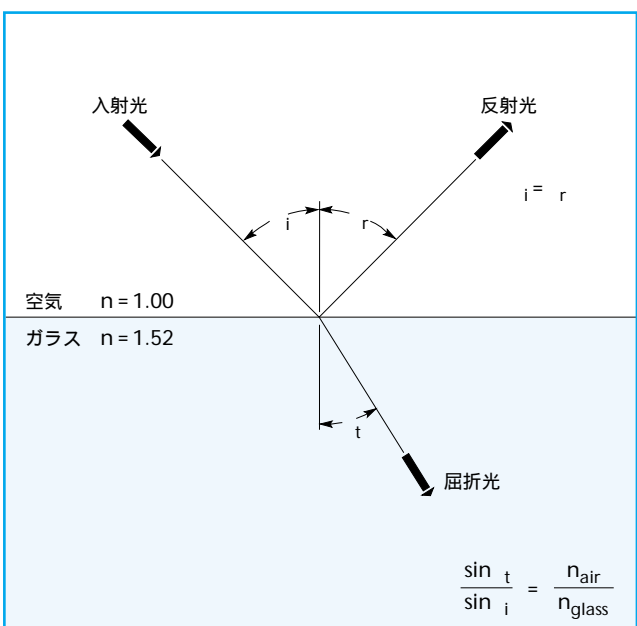


図 5.1 単純な空気 / ガラス境界面での反射と屈折

## 入射角度

反射と透過のビーム強度もまた、入射角度の関数になります。屈折効果の違いにより、内面(裏面)反射と外部反射を区別して考えます。外部反射とは、空気 / ガラス界面または空気 / 水の界面での空気側のように、屈折率の低い媒質が入射側である場合の反射として定義されます。内面反射(または裏面反射)は、その逆の場合です。

## 誘電体境界面での外部反射

2つの誘電体の境界面での反射光と入射光との関係は、フレネルの反射の法則で正確に記述されます。入射光を、入射面に電場ベクトルが平行なp-偏光と、電場ベクトルが垂直なs-偏光の、2つの直線偏光成分の重ね合せと見なすのが良いでしょう。フレネルの法則は、s-偏光成分とp-偏光成分の反射を与える以下の2つの式で要約されます。

$$r_s = \left[ \frac{\sin(i - t)}{\sin(i + t)} \right]^2 \quad (5.2)$$

$$r_p = \left[ \frac{\tan(i - t)}{\tan(i + t)} \right]^2 \quad (5.3)$$

垂直入射の場合には、上記のフレネル公式は以下の簡単な式になります。

$$r_s = \left( \frac{n - 1}{n + 1} \right)^2 \quad (5.4)$$

この式から、屈折率が1.52(クラウンガラス)のとき4 %の反射率になることが判ります。この結果は重要で、空気 / ガラス境界面に垂直入射する光の4 %ほどが反射されることを意味します。多面構成のレンズ系では、減反射コート処理がなされていないと、反射ロスにより透過光量がかなり減少します。

入射角に対するs-偏光成分とp-偏光成分の反射率の変化の様子が、図 5.2に示されています。入射角が30 °程度までは4 %程度の反射率を保持しますが、その後は急激に上昇し、界面すれすれの入射角で100 %に達します。図で、56° 39' でp-成分の反射がゼロになることに注意してください。この角度はブリュースター角と呼ばれ、図 5.3に見られるように、このときの反射光は完全に(s-偏光に)偏光されています。また、このとき反射光と屈折光とは方向が直交しています( $i + t = 90^\circ$ )。これを用いて、ブリュースター角  $\theta_B$ を、 $i = \theta_B = \arctan(n_2/n_1)$ と記述できます。この条件のもとでのp-成分の振動電気双極子は反射光の進行方向に向いているため、p-成分の同方向への伝播が起こりません。ブリュースター角でのs-成分の反射率は15 %ほどです。

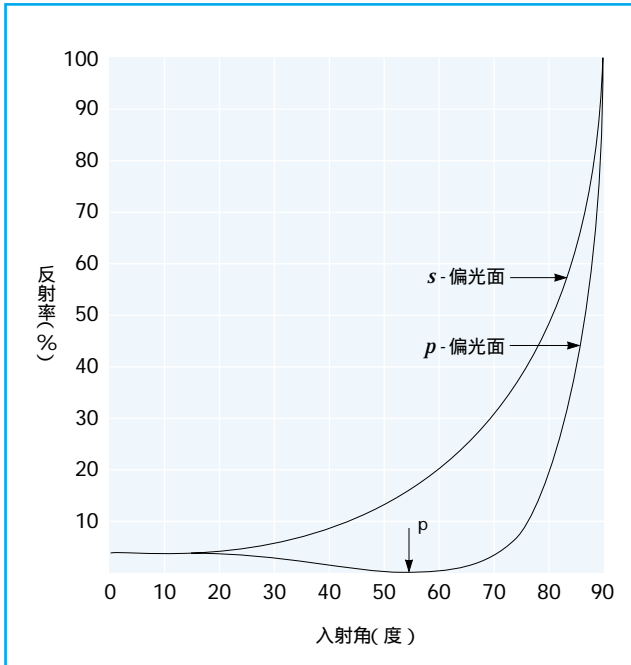


図 5.2 ガラス (n=1.52) の境界面での外部反射、s-偏光とp-偏光成分

誘電体境界面での内面反射

屈折率の高い方の媒質から低い方の媒質へと光が入射する場合にも、全く同様にフレネルの公式を適用できます。スネルの法則より、高屈折率側の媒質での光線入射角度の正弦は、出射角度の正弦を2つの屈折率の比で縮小した値です。図 5.4の外側の媒質でのブリュースター角(56° 39')に対応する、屈折率1.52側の媒質の内面偏光角は33° 21' です。

出射する屈折光の角度が境界面すれすれになるときの入射角は臨界角と呼ばれ、図 5.5の光線cに相当します。外部の媒質が空気(n=1)の時の臨界角は、次式で与えられ、

$$\alpha(\lambda) = \arcsin\left(\frac{1}{n(\lambda)}\right) \quad (5.5)$$

屈折率に依存し、従って波長の関数になっています。臨界角より大きな入射角では、全反射が起こります。

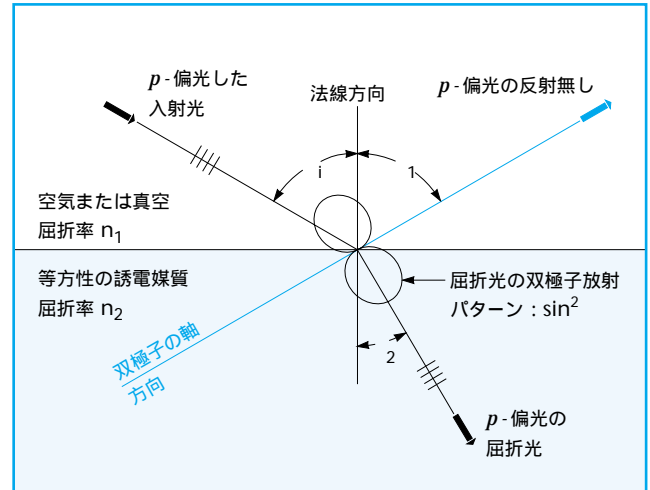


図 5.3 ブリュースター角。この角度で反射光の内のp-偏光成分がゼロになります。

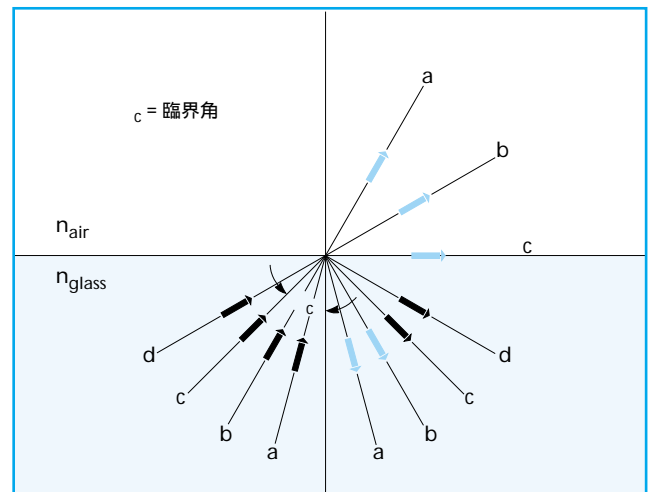


図 5.4 臨界角。この入射角度では境界面に沿って光が射出します。

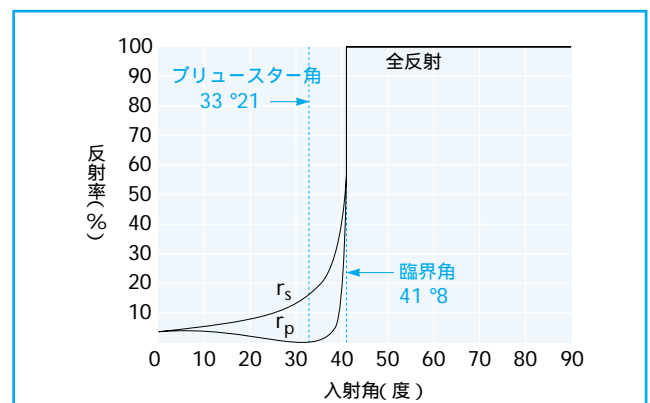


図 5.5 ガラス表面 (n = 1.52) での内面反射。s-およびp-偏光成分。

### 反射による位相の変化

内面反射と外部反射のもう少し微妙な違いがあります。外部反射では、反射時に位相が $180^\circ$ 反転します。内面反射では(全反射のときは別として)このような位相のシフトは起こりません。この事実は多層膜コーティングの重要な原理の1つになっています。

### 干渉

量子力学によれば、光は波動 / 粒子の2重の性質を有します。大抵の古典光学の応用分野では、光の波としての性質が最も重要です。ある種のレーザーシステムとエレクトロ-オプティクスデバイスを別として、光学系の透過特性は古典的波動光学で十分に説明されます。

光の波動性によって、光の干渉効果が起こります。図 5.6 に示すように、互いに同位相の光波は相加的に干渉します。互いに( $180^\circ$ )逆位相の波同士は、相殺的に干渉して振幅が打ち消されます。中間の場合には、全体の振幅は個々の波動振幅のベクトル的な和で計算され、強度は振幅の2乗で与えられます。

光の干渉現象を示す実験や装置は数多くあります。干渉効果の種類によってはレーザーのようなコヒーレントな光が必要なものもありますが、数多くの干渉効果がインコヒーレントな光で実現できます。可視の光の干渉効果で最もよく知られているのは、スリットを用いたヤングの実験、ニュートン環、およびファブリーペローの干渉計等でしょう。これらは大抵の光学および物理の基礎的なテキストに記載されています。

上記の干渉効果のどれも、光源からの光を何らかの方法で2つの類似の波面に分けています。2つの波面は、色々違った光路差を持ちながら再合成されます。波面間の光路差が波長の整数倍と半波長分ずれているときは何時でも、互いの波面が相殺的に干渉して、光強度が極小になります。他方、光路差が丁度波長の整数倍のときは、互いの波面が相加的に干渉して、光強度が極大になります。

### 薄膜の干渉

薄膜コーティングもまた、干渉の原理を利用しています。薄膜の材質は誘電体または金属で、厚みは光の波長と同程度かそれ以下です。光が薄膜に入射すると、光の一部は薄膜の前面で反射し、一部は後面で反射します。残りの光は透過します。ここでは、多重反射を考慮しないことにします。2つの反射波面は、互いに干渉します。干渉の結果は、薄膜の光学的厚みと入射光の波長に依存します。1つの光学要素の光学的厚みは、それと等価の真空厚み(つまり、光がその光学要素を通るに要する時間と

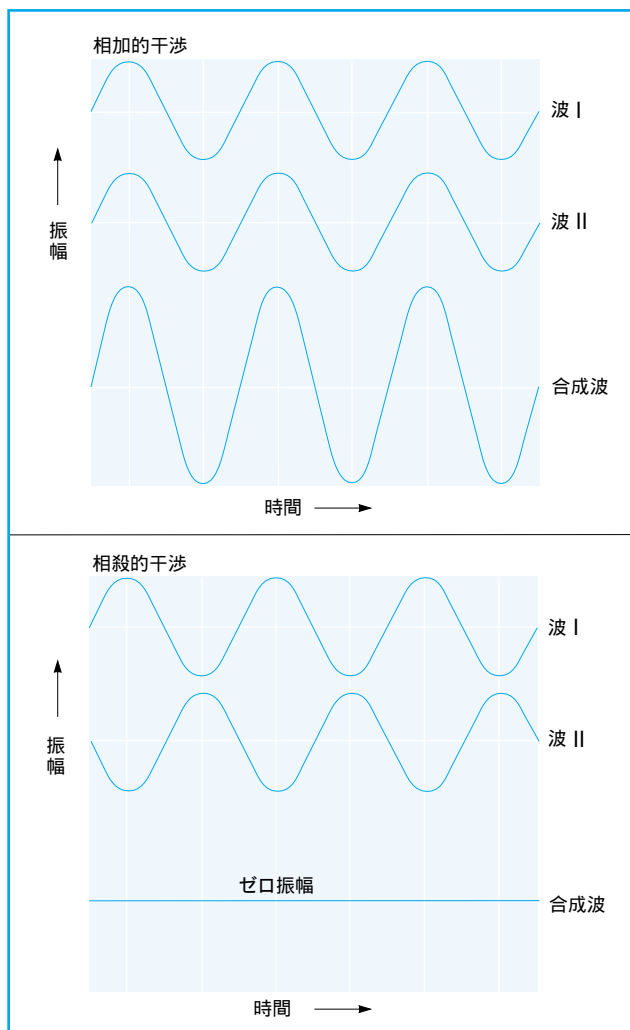
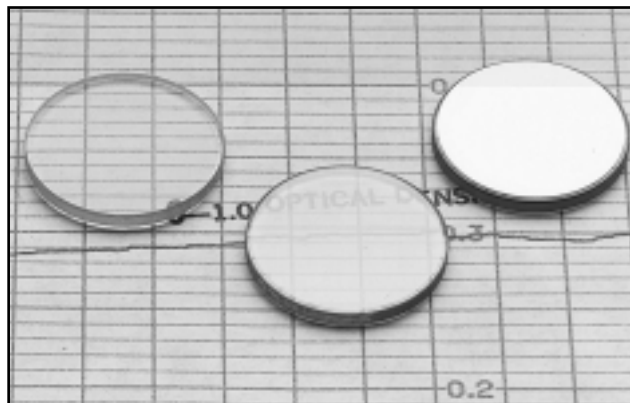


図 5.6 波の相加的干渉と相殺的干渉の簡単な図例



CVIメスグリオでは、様々な単層および多層膜の減反射および高反射コーティングを施すことができます。



同じ時間で真空を伝播する距離)と定義されます。言い換えれば、光学材料の光学的厚みとは、材料の厚みをそれを通る光の波長の見かけの変化率で補正した値といえます。

光学的厚みは、 $t_{op} = t \times n$ 、で与えられます。ここで、 $t$ は実際の厚み、 $n$ は材料中の光速 $v$ と真空中の光速 $c$ との比です。

$$n = \frac{c(\text{真空})}{v(\text{媒質})} \quad (5.6)$$

実質的には、 $n$ は材料の屈折率と見なして構いません。

薄膜に光が垂直入射する場合、2つの反射波面間の位相差は、 $(t_{op}/\lambda) \times 2\pi$ と表面反射に伴う位相のズレの和になります。ここで、 $\lambda$ は光の波長です。もしある入射波長と材料の厚みで、2つの反射面間の位相差が $2\pi$ になると、全体の反射強度は極小になります。2つの反射波の強度が同じ場合には、このときの全体の反射強度はゼロになります。

吸収や散乱が無い場合には、エネルギーの保存則によって、反射光量が小さくなる分だけ透過光量が増すことになります。この場合、反射強度と透過強度の和は入射強度に等しくなります。これは、実験的にも確かめられます。

もし、2つの反射波面の間位相差がゼロ(または $2\pi$ の整数倍)であれば、全体の反射強度は極大になり、その分だけ透過強度が下がります。

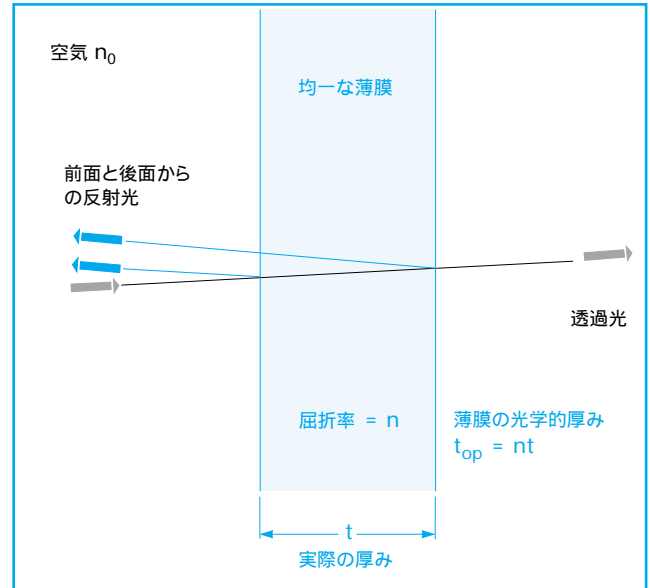


図 5.8 垂直に近い入射角での薄膜の前面と後面の反射の様子

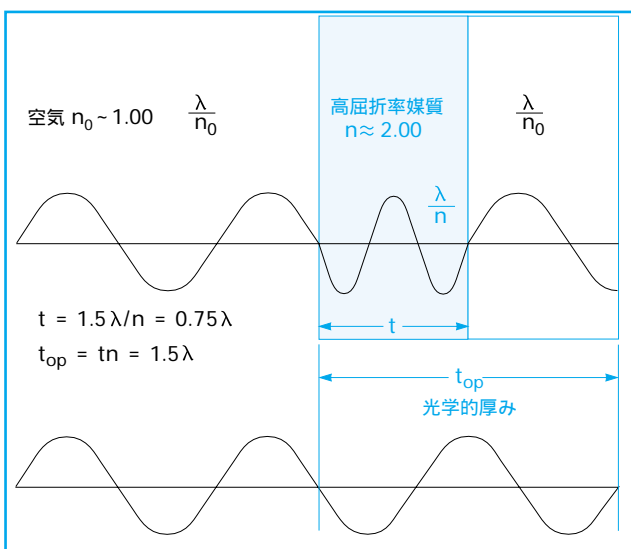


図 5.7 高屈折率媒質で光速が小さくなる効果を示す概念図。この例では、高屈折率媒質内の光速は外側の  $n_0/n = 1/2$  で、媒質の光学的厚みは実際の厚みの2倍になります。



薄膜コーティングの波長特性の測定には分光計を用いています。

# 単層の減反射コーティング

Single Layer Antireflection Coatings

前頁の説明で、単層のAR(減反射)コーティングの原理が判ると思います。ガラス、水晶等の基板に薄膜をコートして、薄膜表面からの反射波面と基板表面からの反射波面との相殺的な干渉が起こるようにしています。これに伴って透過光量が増え、散乱や吸収が無いとして次式が成り立ちます。

$$\text{透過エネルギー} = \text{入射エネルギー} - \text{反射エネルギー}$$

単層コーティングで反射がゼロになる条件は、2つの反射波面の位相が正確に180°(ラジアン)ズレていることと、強度が同じであることの2つです。

## 薄膜の厚み

位相が正確に逆転するためには、単層AR膜の厚みは1/4波長の奇数倍でなければなりません。図 5.9に、完璧な単層ARコーティングの仮想的機構を描いてこのことを示しています。薄膜の屈折率は、空気とガラスの屈折率の間にあるため、両境界面とも反射時に位相がだけシフトします。位相のシフト量が同じですので、干渉には影響しません。従って、2つの反射波面の実質的な位相差は、光路差  $2d \times n_c$  で決まります。ここで、 $d$ は薄膜の実際の厚み、 $n_c$ は薄膜の屈折率です。よって、位相差は  $2d n_c / \lambda$  となります。

単層ARコーティングは、通常薄膜の厚みを  $\lambda/4$  にします。ここで、 $\lambda$  は設計波長です。2つの反射波面間の位相差が丁度逆転して相殺的に干渉します。

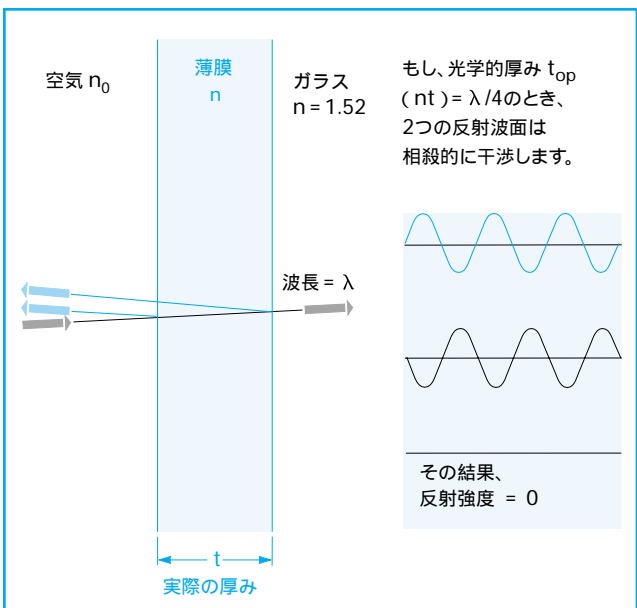


図 5.9 単層の減反射コーティングの概念図

## 屈折率

一つの面に垂直に入射した場合の反射光の強度は、次式になります。

$$\left( \frac{1 - p}{1 + p} \right)^2 \times \text{入射光強度}$$

ここで、 $p$ は境界面を挟む2つの媒質の屈折率の比です。

薄膜がある場合、2つの境界面からの反射光の強度が同じになる条件は、

$$\frac{n_{\text{空気}}}{n_{\text{薄膜}}} = \frac{n_{\text{薄膜}}}{n_{\text{基板}}} \quad (5.8)$$

つまり、3つの屈折率の間に幾何級数的な関係が成り立つことです。

空気の屈折率は1ですので、薄膜の理想的な屈折率は  $n_{\text{基板}}$  となります。光学ガラスの屈折率は、一般的に1.5 ~ 1.75です。クラウンガラスのARコーティング用の理想材料の屈折率は  $n = 1.23$  となりますが、残念ながら、このような低い屈折率で耐久性のある薄膜材料は存在しません。しかし、弗化マグネシウム ( $\text{MgF}_2$ ) は、波長550 nmでの屈折率が1.38と小さく、高品質の安定した薄膜が形成できるため、実用的なAR用薄膜材料として多用されています。

弗化マグネシウムのARコーティング特性は、際立って優秀なわけではありませんが、無コートの場合と比べれば相当な減反射効果があります。通常クラウンガラスの表面は、垂直入射の場合入射光量の4 ~ 5 %を反射します。高品質の  $\text{MgF}_2$  コーティングで、反射損失を1.5 %程度に低減できます。この程度の反射ロスの低減で十分な場合も多く、このような用途には高級な多層膜コーティングは不要です。

単層のARコーティングは、垂直の入射角でのみ、しかも厚み  $\lambda/4$  の膜の屈折率が空気と基板の屈折率の相乗平均値であるときのみ、反射率がゼロになり理想的に機能しますが、 $\text{MgF}_2$  の単層コーティングは、広い波長範囲と広い入射角範囲でかなり良く機能します。事実、垂直入射用の  $\lambda/4$  波長の厚みの単層の  $\text{MgF}_2$  膜は、大きな入射角で入射する光線の多い急な角度の付いた面の透過率の改善に大きな効力を発揮します。

## 波長依存性

他の薄膜と同様に、特性は次の2つの理由で入射光の波長に依存します。1番目に、設計波長以外の波長では膜厚が  $\lambda/4$  にならないことです。このことは、全ての薄膜設計プログラムで考慮に入れています。2番目は、もっと微妙でかなり重要な効果ですが、薄膜および基板の分散(つまり屈折率の波長依存性)の効果です。メレスグリオが使っているような、ごく最近の薄膜設計プログラムでのみ、この効果を考慮した多層コーティングの設計ができるようになりました。単層のARコーティングでは、コーティングの波長依存性を解析的に評価することも可能です。

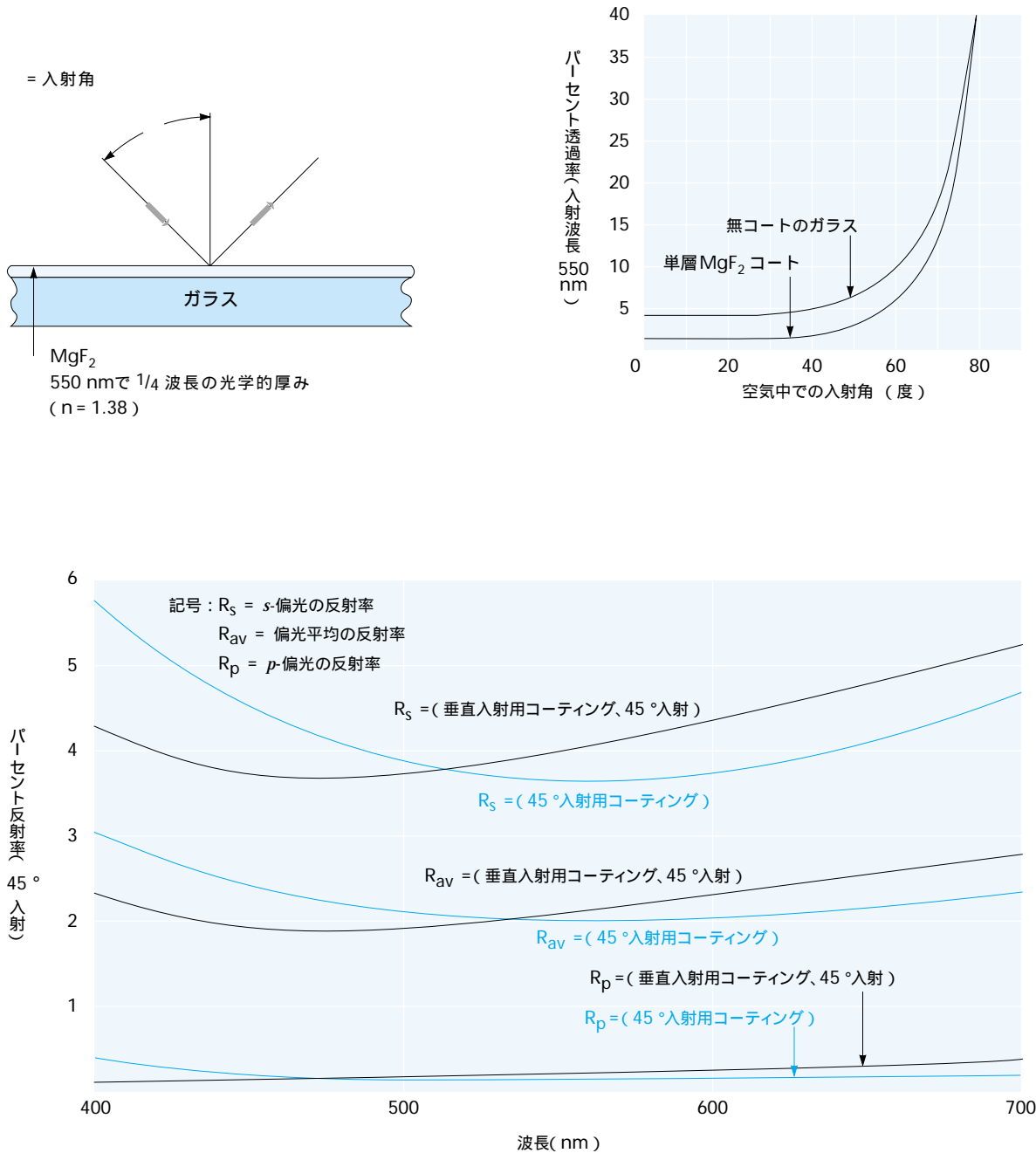


図 5.10 (設計波長550 nm) 垂直入射用の薄膜と45°入射用薄膜との、45°入射での特性比較



### 入射角

どんな薄膜コーティングでも、入射角が変われば反射率も変わりますが、それには2つの主要な理由が挙げられます。まず、前面と後面の反射波面の光路差が入射角によって変わることが挙げられます。入射角がゼロ(垂直入射)から増加すると、光路差が小さくなります。この光路差の変化で、2つの反射波面の位相差が変わります。これは、ファブリーペロー干渉計を傾ける場合と同じです。

また、入射角が変わると、図 5.10に見られるように、光学表面からの反射率も変化します。このように、任意の入射角の場合の薄膜の特性の評価は、2つの反射波面の位相差の変化と相対振幅の変化の両方の効果があるため、単層のAR コーティングの場合でもかなり複雑です。

### コーティング公式(単層)

単層コーティングは実際には非常に有用で、特に斜め入射の場合に多用されるため、波長と入射角と偏光の関数としてコーティングの反射率が計算できる公式があると役立ちます。

### コーティングの分散公式

単層ARコーティングの特性を評価する最初のステップとして、特定の波長での薄膜と基板の屈折率を求めます。光学的観点からは、薄膜は均一と見なせます。MgF<sub>2</sub>の屈折率は、非晶質でも結晶でも、ローレンツ-ローレンツの法則によって密度と結び付いています。非晶質の場合では、結晶の常光成分の屈折率と異常光成分の屈折率とが平均化されます。

結晶化MgF<sub>2</sub>の公式は、常光成分と異常光成分について各々次式で与えられます。

$$n_o = 1.36957 + \frac{(3.5821)(10^{-3})}{(\lambda + 0.14925)} \quad (5.9)$$

$$n_e = 1.381 + \frac{(3.7415)(10^{-3})}{(\lambda - 0.14947)} \quad (5.10)$$

ここで、 $\lambda$ は波長でミクロン単位とします。屈折率の常光成分と異常光成分を平均化して、

$$n = n(\lambda) = \frac{1}{2}(n_o + n_e) \quad (5.11)$$

1.38という値が、波長550 nmでのMgF<sub>2</sub>の非晶質薄膜の屈折率として一般的に認められています。

しかしこの値は、充填率が100%と仮定したときの値です。実際の薄膜には少し孔が有り充填率が100%を下回るため、屈折率は1.38より少し小さい値になります。充填率は製造工程によって微妙に変わるので、バッチごとに少しばらつきます。空

気や水蒸気も薄膜内に入り込んで屈折率を変化させます。CVIメレグリオの弗化マグネシウムコーティングの実効的な屈折率は、通常理論値1.38の97%から100%の間の値を取ります。

### コートされた表面の垂直入射の反射率

コーティングの光学的厚みが、或る波長について1/4波長であるとしましょう。 $n_a$ を外側の媒質の屈折率(空気の場合は1)、 $n_f$ と $n_s$ を各々薄膜と基板の屈折率とします。この波長での薄膜コート面の垂直入射時の反射率は、次式で与えられます。

$$R = \left( \frac{n_a n_s - n_f^2}{n_a n_s + n_f^2} \right)^2 \quad (5.12)$$

これは、入射光の偏光状態には無関係です。

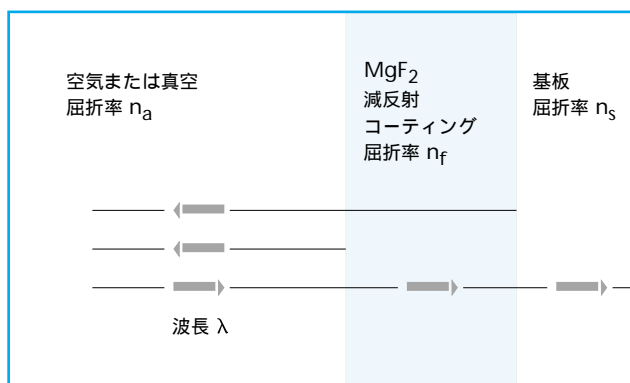


図 5.11 垂直入射での反射の様子

### コートされた表面の斜め入射の反射率

斜め入射では、状況はもっと複雑です。図 5.13のように、 $n_1$ 、 $n_2$ および $n_3$ を各々、外部媒質(空気、真空等)、薄膜、および基板の屈折率とします。屈折率は波長に依存します。或る波長 $\lambda_d$ と外部媒質の或る入射角 $\theta_{1d}$ のときに薄膜の反射率が極値を取るとしましょう。 $\theta_{1d}$ と $\lambda_d$ が判れば、薄膜が完全に規定されます。薄膜の屈折率 $n_2$ が $n_3$ より小さいときは、極値は極小値で、その逆のときは極大値になります。どちらの場合にも同じ公式が適用できます。入射角 $\theta_{1d}$ に対応した薄膜の屈折角 $\theta_{2d}$ は、次式になります。

$$\theta_{2d} = \arcsin \left( \frac{n_1(\lambda_d) \sin \theta_{1d}}{n_2(\lambda_d)} \right) \quad (5.13)$$

$\theta_{1d}$ が $\theta_{1d}$ からゼロに減少すると、反射率の極値を与える波長が $\lambda_d$ から $\lambda_n$ にシフトします。ここで、添数nは垂直入射を意味します。この波長は、次式で与えられます。

$$\lambda_n = \left( \frac{n_2(\lambda_n)}{n_2(\lambda_d)} \right) \left( \frac{\lambda_d}{\cos \theta_{2d}} \right) \quad (5.14)$$

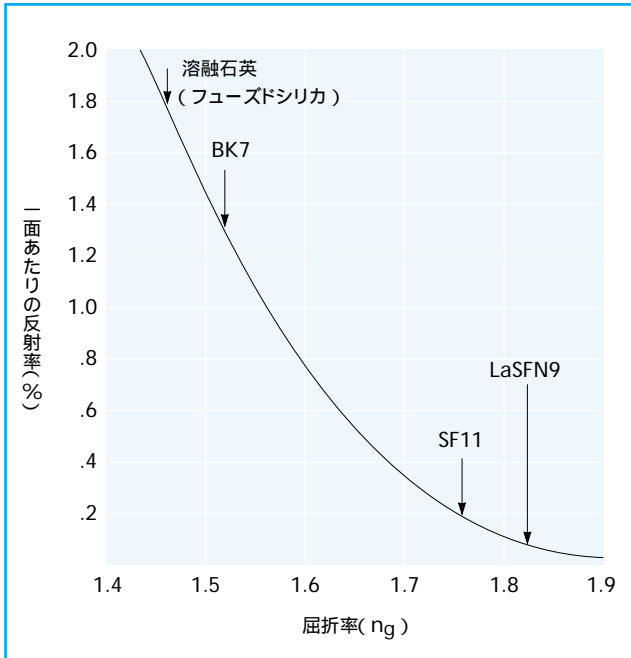


図 5.12 屈折率 $n_g$ のガラスに1/4 波長の弗化マグネシウム (屈折率 = 1.38) をコートしたときの反射率

任意の入射角  $\theta_1$  と任意の波長  $\lambda$  に対する薄膜内と基板内の屈折角は、次のように与えられます。

$$\theta_2 = \arcsin \left( \frac{n_1(\lambda) \sin \theta_1}{n_2(\lambda)} \right) \quad (5.15)$$

$$\theta_3 = \arcsin \left( \frac{n_1(\lambda) \sin \theta_1}{n_3(\lambda)} \right) \quad (5.16)$$

次式は、p-偏光とs-偏光に関する、一つの境界面での振幅反射率を与える公式です。

$$r_{12p} = \frac{n_2 \cos \theta_1 - n_1 \cos \theta_2}{n_2 \cos \theta_1 + n_1 \cos \theta_2} \quad (5.17)$$

$$r_{23p} = \frac{n_3 \cos \theta_2 - n_2 \cos \theta_3}{n_3 \cos \theta_2 + n_2 \cos \theta_3} \quad (5.18)$$

$$r_{12s} = \frac{n_1 \cos \theta_1 - n_2 \cos \theta_2}{n_1 \cos \theta_1 + n_2 \cos \theta_2} \quad (5.19)$$

$$r_{23s} = \frac{n_2 \cos \theta_2 - n_3 \cos \theta_3}{n_2 \cos \theta_2 + n_3 \cos \theta_3} \quad (5.20)$$

上で、例えば添数“12p”の付いた式は、1番目と2番目の境界面でのp-偏光の振幅反射率を意味します。

これに対応して、薄膜コートされた面からの強度反射率 $R_p$ と $R_s$ が、以下のように与えられます。

$$R_p = \frac{r_{12p}^2 + r_{23p}^2 + 2r_{12p}r_{23p}\cos(2\delta)}{1 + r_{12p}^2r_{23p}^2 + 2r_{12p}r_{23p}\cos(2\delta)} \quad (5.21)$$

$$R_s = \frac{r_{12s}^2 + r_{23s}^2 + 2r_{12s}r_{23s}\cos(2\delta)}{1 + r_{12s}^2r_{23s}^2 + 2r_{12s}r_{23s}\cos(2\delta)} \quad (5.22)$$

ここで、 $\delta$  は薄膜の前面と後面による2つ反射波面の間の (外部の媒質内での) 位相差で、次式で与えられます。

$$\delta = \frac{2}{\lambda} n_2(\lambda) h \cos \theta_2 \quad (5.23)$$

$h$  は膜の物理的厚みです。上式による  $\delta$  はラジアン単位です。平均の反射率は次式になります。

$$\bar{R} = \frac{1}{2} (R_p + R_s) \quad (5.24)$$

入射波長  $\lambda$  と入射角  $\theta_1$  を指定すれば、これらの公式によって反射率が求められます。

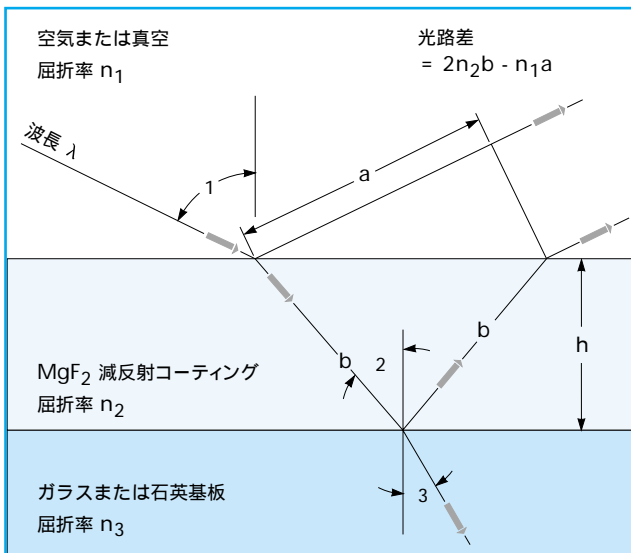


図 5.13 斜め入射での反射の様子

# 多層の減反射コーティング

Multilayer Antireflection Coatings

前節では、薄膜設計の基本原則と弗化マグネシウムの単層減反射コーティングの働きについて議論しました。多層コーティングの働きを理解するために、まず2層の減反射コーティングを論じましょう。ここでは薄膜設計と機能の全てを取り扱うわけには行きませんが、お客様がこの節の説明で薄膜の理解を深めて光学系の設計の際に価格効率の高いコーティングを選ぶことができるよう、お役に立てればと思います。

減反射コーティングには2つの基本タイプがあり、詳しく見ておく価値があります。

## 1/4-1/4 コーティング

このタイプは、単層コーティング用の最適の屈折率の材料が無い場合の代用として考案され、今も用いられています。原理は極めて簡単です。単層減反射コーティングでの大きな問題点はコーティング材料の屈折率が大き過ぎて、第1面からの反射波のほうが第2面からの反射波より強く互いに相殺しきれないことです。2層のコーティングでは、第1面の強い反射波を第2面と第3面からの2つの弱めの反射波で相殺します。

1/4-1/4コーティングは、各層が指定波長で1/4波長分の光学的厚みとなる2層構造です。外側の層は基板より低い屈折率の材質で、内側の層は基板より高い屈折率の材質です。図 5.14 に示すように、第2面と第3面からの反射波は第1面からの反射波と比べて位相が正確に180°ずれています。

設計では、他の多層膜コーティングと同様に、各層での反射波の相対振幅と位相を求めて、それらを足し合わせて全体としての反射振幅を導出します。この反射振幅の2乗を取れば、反射強度が得られます。

多層膜コーティングの各層の屈折率をどのように決めるのでしょうか。薄膜コーティングの特性を求めるための何通りかの方法論がここ40～50年の間に発達し、最適化設計法へと進化しました。近年、パワフルなPCと優れた薄膜設計ソフトが普及したお蔭で、薄膜設計の分野も一新されました。

垂直入射の1波長で最適化された2層の1/4-1/4コーティングでは、手計算で薄膜の最適屈折率を求めることができます。このコーティングで反射が消えるための屈折率の関係式は、次の通りです。

$$\frac{n_1^2 n_3}{n_2^2} = n_0 \quad (5.25)$$

ここで、図 5.14に示すように、 $n_0$ は空気の屈折率(約1.0)、 $n_3$ は基板の屈折率、 $n_1$ と $n_2$ はコーティング薄膜の各層の屈折率です。

基板が屈折率1.52のクラウンガラスとし、コーティングの第1層が最も小さい屈折率1.38のMgF<sub>2</sub>とすると、第2層の屈折率は1.70の高い値が必要です。第2層には、酸化ベリリウムか酸化マグネシウムが使えますが、どちらも柔らかな材質で耐久性に劣ります。1/4-1/4 コーティングでは、コーティング材料の選択の自由度が若干あり、反射を極めて小さくできますが、設計の自由度は極めて狭いです。2種類の材料を同時に蒸着して任意の屈折率の薄膜を生成することが、原理的には可能ですが、そのようなコーティングはあまり実用的ではありません。そこで、多層膜構造の減反射コーティングと、各層の屈折率を適当に選べる2層構造のコーティングの技術が発達して来ました。

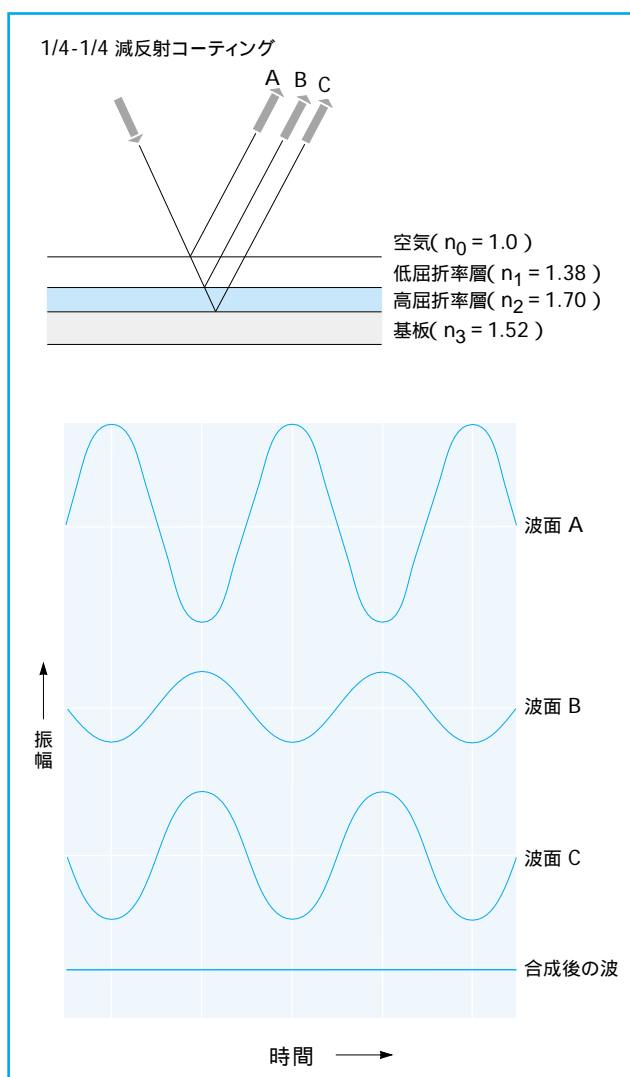


図 5.14 代表的な1/4-1/4 コーティングによる干渉

### 任意の膜厚の2層コーティング

今までは、位相差が $0^\circ$  または $180^\circ$  の波面間の相加的または相殺的干涉のみを見てきました。1層のAR コーティングでは、2つの反射波面の位相差が $180^\circ$  でないと正確に相殺できません。しかし、反射面が3面またはそれ以上有る場合には、反射波面の中の位相差と反射振幅を適当な値に選ぶことで、反射を完全に相殺することができます。これが2層の減反射コーティングの基礎的な考えで、入手可能な材料で位相差を調整することで反射波の相殺を図ります。2層コーティング用の2つの材料を指定すると、設計波長で反射がゼロとなる膜厚の組み合わせは2通りあり、総膜厚が互いに異なります。実用的には、膜の機械的応力が小さくなるように、コーティングの総膜厚が薄い方の組み合わせを選びます。さらに、この組み合わせの方が、反射強度の波長依存性も小さくなっています。

2層の減反射コーティングは、いわゆるV-コーティングの中の最も簡単なものです。V-コーティングの名前は、その分光反射率曲線が、設計波長で極小値となる歪んだVの字形状になることに由来します。V-コーティングは、632.8 nmのヘリウムネオンレーザーなどの一定波長を用いる光学系のような、ほぼ単色の入射光用の一般的で廉価なコーティングです。

### 広帯域の減反射コーティング

結像系を始めとする種々の光学システムでは、多色つまり複数の波長の光が用いられます。この際、使用波長の全域で光学系がフラットな透過特性を持つように、光学部品に広帯域の減反射コーティングが施されます。薄膜設計では、コーティングの中にアブゼンティー層を挿入することで広い波長域で良好な減反射特性を持たせるテクニックがよく用いられます。高反射コーティングと波長選択フィルターでは、特性の向上を図るのにもう2つのテクニックが用いられますが、減反射コーティングには適用されません。

### アブゼンティー層

アブゼンティー層(不感層)は、1つの特定の波長(通常は設計波長)でこの層の厚みが $1/2$  波長の誘電体の薄膜で、この層の前後の2面での反射波面が丁度打ち消し合うようになっているため、この波長については、この層の有無でコーティング全体の特性は変わりません。

それ以外の波長では、アブゼンティー層が $1/2$  波長にならないことと材料の屈折率の分散効果で、膜の反射特性に影響を与えます。

### 多層の広帯域減反射コーティング

CVIメレスグリオでは、極めて複雑なコンピュータ設計技術を用いて、多層の広帯域減反射コーティングの設計を行なっています。その基本点は、前述の干涉と位相シフトの2つの効果です。種々の薄膜要素からの総合的な影響を計算します。多層膜では、コヒーレントな干涉であるため、個々の膜の反射を別々に計算してその和を取っても意味がありません。各層の光学特性は、隣り合う層の間で互いに影響を受けます。多層膜コーティングの反射特性は、最も簡単な場合でも各層の影響が1つの複素数行列で記述された行列の積として表されます。

素朴なモデルでは、多層コーティングの層間の多重反射の重要な効果が見落とされています。前節までの説明では、1次の反射の効果のみ考慮して来ましたが、多層膜のコーティングでは1次の反射効果だけでは現象を正しく記述できません。正確なモデリングを行なうには、1次のみならず、2次、3次、それ以上の多重反射の影響も全て考慮する必要があります。当然、基板の屈折率も多層コーティングの特性に影響を与えます。本カタログでは、反射/透過特別にコーティングの品番を与えていますが、実際には、同じ品番でも基板の屈折率によってコーティング設計を若干調整して所定の反射/透過特性を満すように工夫しています。

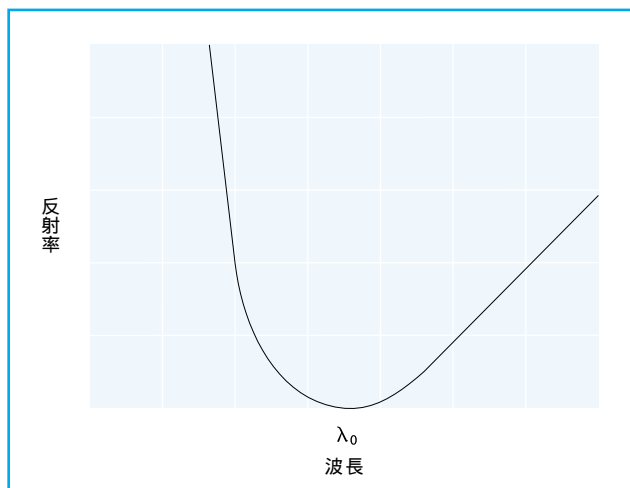


図 5.15 V-コーティングの名前は、その特性曲線の形に由来します。



# 高反射コーティング

High Reflection Coatings

CVIメレグリオは、ミラー、ビームスプリッター、偏光ビームスプリッター、ダイクロイックミラー、バンドパスフィルター、および選択反射フィルターなどの種々の高反射コーティングを行っております。この内の幾つかのコーティングは、お客様の指定の基板に施されますが、それ以外のコーティングは所定の基板に施して当社の特定の光学部品にした形でのみ提供しています。高反射コーティングの注文は、減反射コーティングと同様、コーティングを施したい光学部品の製品番号にコーティング添数を書き添えて行ないます。

表面反射ミラーとするには、平面ガラスのような光学部品の表面に高反射コーティングを施します。内面反射(裏面反射)ミラー用には、プリズムのような光学部品の内面反射する面にコーティングを施します。

高反射コーティングには、金属コーティングと誘電体コーティングの2種類があります。

## 誘電体コーティング

誘電体の減反射コーティングと同様の原理で、高反射の誘電体膜が作れます。屈折率の高い誘電体膜と低い誘電体膜を1/4波長の厚みで交互に積層することにより、各層の境界面からの反射波面が相加的に重なって、高効率のリフレクターが得られます。

反射曲線に2つのピークが現れますが、そのピーク波長は、用いる2種類の膜材料の屈折率の比と積層させる層のペア数に依存します。

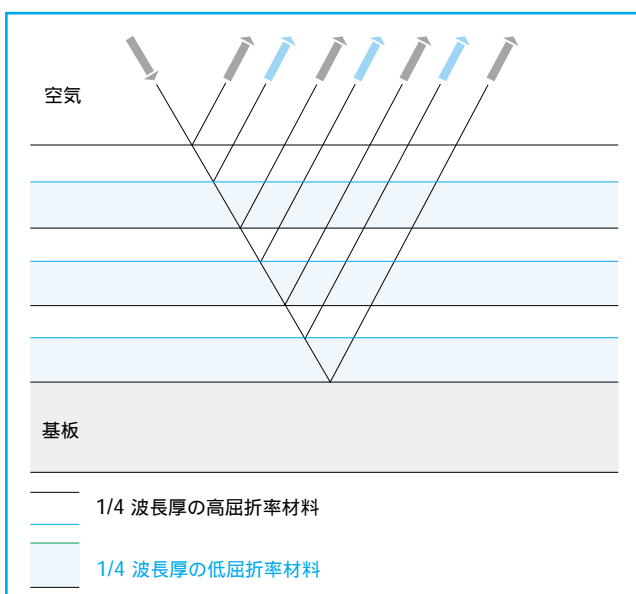


図 5.16 単純な1/4 波長厚の積層構造

反射曲線の有効幅も2つの膜材料の屈折率の比に依存し、比が高いほど有効幅が広がります。減反射コーティングとは違って、高反射コーティングの反射曲線の形状を幾つかの方法で変えることができます。特性を変える非常に有効な方法として、中心波長をずらした2つまたはそれ以上の層ペアを挿入する方法と、多層膜の中の層ごとに厚みを若干変える方法の、2つがあります。

波長範囲を限定すれば、誘電体コーティングを用いて、金属コーティングより遥かに優れた反射特性が実現できます。このような高反射多層膜は、s-とp-の両方の偏光成分に対して、かなり広い入射角で有効です。しかし入射角が90°近くになると、反射特性が急激に悪くなります。

使われる材料の関係で、高反射多層膜は、金属膜に比べて耐久性と耐摩耗性の両方とも優れているのが普通です。

## 特性曲線

一つの誘電体積層構造の分光反射率曲線は、図 5.17のように頭が平らな特徴的な逆V形状をしています。屈折率の高い層も低い層も光学的厚みは指定波長の1/4になりますが、この指定波長で反射率が最大となります。

分光反射率曲線で、高い反射率のかなり狭い波長域の外では、反射率は振動しながらゼロへと低下します。高い反射率の領域の幅と高さは積層構造の2種の誘電体物質の屈折率の比と積層構造の中の実際の層数の両方の関数になります。積層数を増やしても屈折率の比を増しても、反射率のピーク値が増加します。積層コーティングによる振幅反射率は、次の式で与えられます。

$$\frac{(1 - p)}{(1 + p)}$$

$$\text{ここで、 } P = \left( \frac{n_H}{n_L} \right)^{N-1} \times \frac{n_H^2}{n_S} \quad (5.26)$$

$n_S$ は基板の屈折率、 $n_H$ と $n_L$ は各々高屈折率層と低屈折率層の屈折率、 $N$ は積層構造の中の全層数です。

分光反射率曲線の高い反射率部分の幅もまた、2層の屈折率の比で決まります。屈折率比が大きいほど高反射率部分の幅が広がります。

## 散乱

薄膜の特性を表す主なパラメータは反射率と透過率(それに吸収があれば吸収率)です。今一つ曖昧ですが、光散乱ももう一つのパラメータです。光散乱は、薄膜の材料の粒性に基づくため、定式化が困難です。入射光の一部が薄膜内の微小粒子による鏡面反射で失われます。コーティングの機械的応力やコーティングの弱さよりむしろ光散乱によって光学コーティングの厚みの最大値が規定される場合がよくあります。



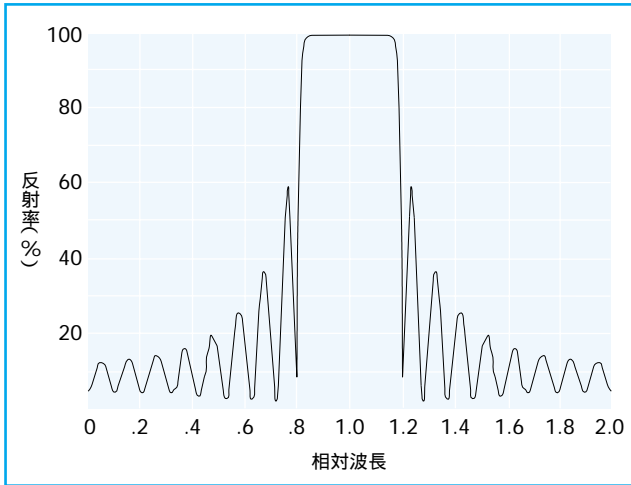


図 5.17 無変調の1/4 波長積層構造の反射率曲線の代表例

### 広帯域コーティング

高反射コーティングの反射率曲線の固有の形状は、減反射コーティングの場合と違って、幾通りかの方法で変えることができます。その中で、コーティング内の2~3の積層の指定波長を若干シフトする方法と、積層内の個々の層膜厚を若干変動させる方法の2つが特に有効です。

多層膜高反射コーティングでは、1つのコーティング内に幾つかの異なる指定波長に対応した層を埋め込むことにより反射特性を変えられることができるなど、多層膜減反射コーティングとは微妙な違いがあります。互いに異なる指定波長に対応する積層膜が幾つか重なってできた多層膜を考えましょう。このような多層膜の反射特性は、これらのどの指定波長領域でも高い反射率ピークを有します。入射光の波長がこれら幾つかの指定波長のどれかに近いとき、それに対応した積層膜部分ではほぼ完全に反射されます。それ以外の積層部分では透過するか部分反射するかしますが、あまり問題ではありません。

他方、減反射コーティングの場合でも、或る波長で1つの積層部分が正確に減反射条件を満たしていても、その他の積層部で高反射条件を満たしていれば、その波長での多層膜全体の反射率は高くなります。

このことは、次のような、「幾つかの異なる積層部分よりなる多層膜の任意の波長での反射率は、多層膜内のその波長の反射率が最も高い積層部分単体の反射率よりも高い。」という経験則に要約できます。ただし、1つの積層部分内の反射波面だけではなく異なる積層部分の反射波面の間でも干渉が起きる場合には、上の経験則は成り立ちません。その代表例が狭帯域の干渉フィルターで、第16章「フィルターとエタロン」で詳細に説明されています。

W5.14 コーティングの特性

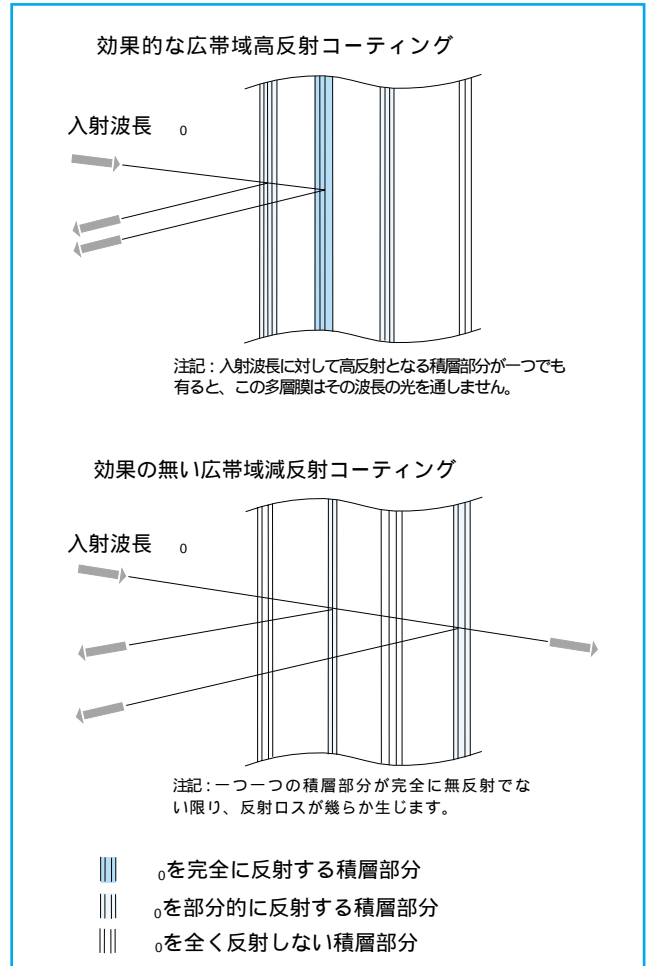


図 5.18 異なる積層構造を重ね合わせた多層膜で入射波長が一つの積層部分の指定波長に合致するときの概念図。この構造は高反射コーティングでは有効ですが、減反射コーティングでは効果がありません。

### 広帯域の反射コーティング

広帯域の反射コーティングの設計手順がこれで理解できたことでしょう。実際に使う技法が2つあります。1つは、もう明白ですが、設計波長が互いにずれた2つの1/4 積層構造を合わせることです。このタイプのコーティングは、厚くなりすぎて光散乱が大きすぎる嫌いがあります。この基本デザインはダイクロイック高反射リフレクターに応用され、2つの積層構造に対応した2つの波長で反射率のピークが生じます。

広帯域化のもっとエレガントな方法として、1つの1/4 波長積層構造に変調を加える方法があります。この変調積層構造の各層は、同じ光学的厚みになっておらず、意図する反射バンドの両端の2つの設計波長のうちの一方の1/4 波長膜厚から他方の1/4 波長膜厚へと次第に連続的に変化しています。層同士の

膜厚の変化率は、通常、等差級数的または等比級数的に選ばれます。このタイプのデザインを用いると、数百ナノメートルの波長範囲にわたって99%以上の反射率を有する反射コーティングが作成できます。このような非常に帯域の広いフレクターが現れたことで、もっとも恩恵を受けたのは色素レーザーとその応用分野でしょう。色素レーザーのような波長可変の光学系では、広い波長範囲で高い反射率を持つミラーが絶対必要です。レーザーを使わないシステムでも、金属膜ミラーより反射率の高い誘電体ミラーの方が望ましい場合が多くあります。可視域のほぼ全域で高い反射率を持つ多層の広帯域コーティングが製品化されています。このような高反射薄膜はs-偏光にもp-偏光にも有効で、広い範囲の入射角で使えます。但し、入射角が90°に近づくにつれて、反射率が急激に低下します。

多層膜の材料の性質により、この膜は金属膜に比べて遥かに傷が付きにくく丈夫です。相当広い波長範囲で金属膜の反射率を超える誘電体コーティングを作れますが、金属膜は、ただ一層のコーティングで極めて広い入射角範囲と波長範囲で使用できるミラーが得られる点で、非常に優れた反射被膜です。

### 偏光効果

光学面に垂直ではない角度で光が入射すると、常にs-とp-偏光成分の反射率/透過率曲線に違いが現れます。この違いを極めて小さくすることができる場合もありますが、逆に、薄膜の偏光子のように、この差異を最大限に際立たせた薄膜設計をする場合もあります。減反射コーティングは、偏光成分の区別が無い垂直入射で用いられる場合が多いので、通常は偏光の効果は考慮されません。

高反射または部分反射コーティングは、ビーム操作またはビームスプリッター用として、垂直以外の入射角、特に45°で使われる場合が多々あります。ですから、このタイプのコーティングでは偏光効果が極めて重要になり得ます。

誘電体多層膜コーティングでは、特定の波長域でs-とp-偏光成分の反射率に際立った違いが現れます。

この効果は、斜め入射する光線のs-とp-の偏光成分に対する多層膜の有効屈折率が互いに異なることに起因します。この効果は、カルサイトなどのある種の結晶が示す複屈折性とは異なった現象で、膜の物質が特定の対称性の結晶状態でなくとも起こります。実際、斜め入射した光の多層膜の中での電場と磁場の様子がs-とp-偏光成分とで異なることにより、その各々の成分の多層膜中での有効屈折率に違いが生じます。

この現象によるs-とp-偏光の反射率の違いは何時も同じ傾向で、斜め入射のときのs-偏光の最大反射率は、常にp-偏光の

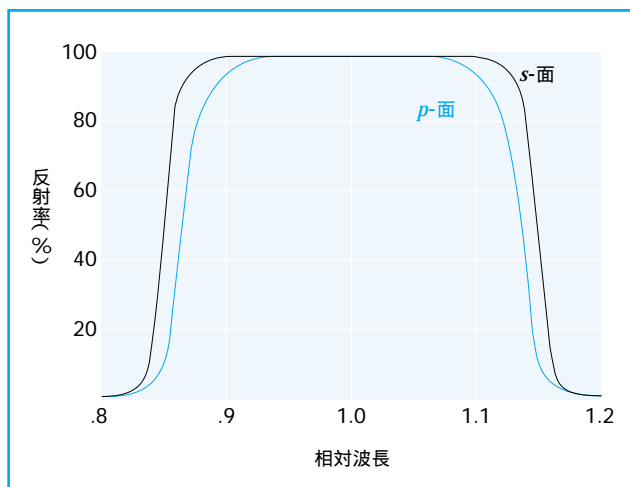


図 5.19 斜め入射のときの反射特性。s-偏光の反射率曲線が常にp-偏光の反射率曲線を上回り、幅も広くなります。

最大反射率を上回ります。斜め入射のときの分光反射率曲線を描くと、広い波長範囲にわたってs-偏光成分の反射ピークがp-偏光成分のそれを上回ることが判ります。

多層膜コーティングは、偏光状態の依存性を小さく設計したピーク反射率の波長近辺で用いられる場合が多々あります。逆に、偏光状態による反射率の差異を積極的に利用する場合もあります。斜め入射の反射率曲線のピークの端近くで、s-偏光成分の反射率とp-偏光成分の反射率が大きく異なる波長域がありますが、この差異を際立たせた設計を行えば、極めて効率の良い薄膜偏光子が作成できます。

### エッジフィルター、およびホットまたはコールドミラー

特定の波長より長い波長を全て通すフィルター、あるいは特定の波長より短い波長を全て通すフィルターが必要な光学系も多々あります。このようなタイプのフィルターは、短波長カットフィルターあるいは長波長カットフィルターとも呼ばれています。

このようなフィルターとして、色ガラスが長年使われてきました。当社も、第16章「フィルターとエタロン」にあるように、廉価で有用な色ガラスフィルターを数多く取り扱っています。この色ガラスフィルターで十分な用途も多いのですが、欠点が2つあります。1つは、色ガラスが不必要な波長を吸収して取り除く点で、照明系などのように強い照射強度の光が当たる場合は問題になります。2つ目は、エッジ部が十分にシャープに変化していない点で、用途によっては問題になります。

変調 $1/4$ 波長積層構造を基本ブロックとした薄膜のエッジフィルターが、現在製品化され出回っています。CVIメレスグリオは、お客様のお使いになり易い仕様のエッジフィルターを、カタログ標準品として数多く取り揃えています。

このタイプのフィルターは、光源から強い熱線が放射される高出力の投影系に主に用いられます。放射線を可視波長成分と赤外波長成分に分離する薄膜フィルターは、どちらの波長成分を透過させるかによって、ホットミラーあるいはコールドミラーと呼ばれています。CVIメレスグリオは、ホットミラーとコールドミラーをカタログ標準品として取り扱っています。第16章「フィルターとエタロン」をご参照ください。

### 干渉フィルター

多くの用途で、特に共鳴状態の原子または分子の分光測定において、入射光の内の極めて狭い波長範囲のみを透過する特殊なフィルターが必要になります。特に波長分解精度を要するアプリケーションではモノクロメーターが用いられますが、光量が非常に弱くなります。決まった波長で程々の分解能が必要な用途には、干渉フィルターを用います。

干渉フィルターは、色ガラス基板の上に構造の複雑な多層膜を付けて作られます。この多層膜は、非常に薄い連続共振器(ファブリーペロー干渉計)として働く一連の広帯域 $1/4$ 波長積層構造(スタック)で構成されます。色ガラスは、この多層膜共振器の高次の干渉透過波長を吸収除去します。

図 5.20は、CVIメレスグリオの代表的な干渉フィルターの、可視40フィルターセットの550 nm用フィルターの透過率曲線です。透過率曲線が550 nm近辺のみ矩形的に高くなり、それ以外で急速にゼロに低下しています。

第16章「フィルターとエタロン」に、干渉フィルターに関する構造と動作原理の詳しい説明と製品紹介があります。

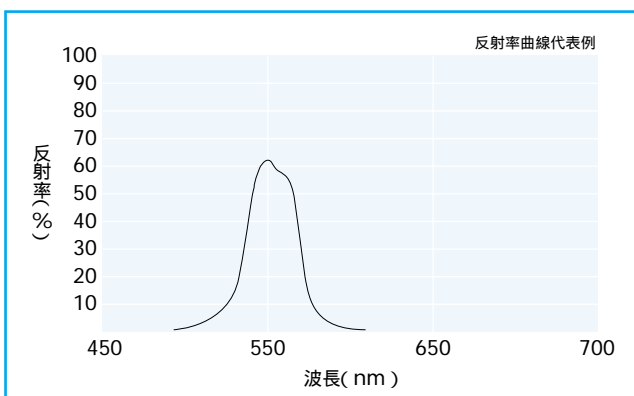


図 5.20 干渉フィルターの分光透過率特性の例

W5.16 コーティングの特性

### 部分反射コーティング

入射ビームを適当な強度比の2本のビームに分割したい場合がよくあります。ビームの分割は、適当な光学面に斜めに(通常は $45^\circ$ で)光ビームを入射させれば起こります。通常、2つのビームの分割強度比と偏光比を変えるために、光学面に多層膜を施しています。

従来の金属薄膜のビームスプリッターに替わる製品として、層数の少ない誘電体積層膜でできた広帯域(あるいは狭帯域)ビームスプリッターがあります。金属薄膜のビームスプリッターの場合と同様に、透過ビームと反射ビームの分岐比は入射角度によって変わりますが、通常 $45^\circ$ 入射で用いるので、このことはあまり問題にはなりません。誘電体ビームスプリッターは、金属薄膜に比べて吸収と散乱が非常に小さい利点がありますが、欠点が2つあります。コーティングの特性が金属薄膜よりも波長依存性が高いことと、入射ビームの透過/反射特性がsとpの偏光成分で大きく異なることです。偏光したレーザー光を用いる場合には、反射と透過ビームの部分偏光度の違いはあまり問題にはなりません。ビームスプリッターとしては、この点は欠点になります。この点では、金属-誘電体ハイブリッドコーティングが、最もバランスが取れた製品といえるでしょう。

CVIメレスグリオのコート付きビームスプリッターには、広帯域特性で偏光補償のないものと広帯域特性で偏光補償が少々あるものの2種類に加え、特定のレーザー波長で実質的に無偏光の特性を実現した新しいキューブビームスプリッター製品群があります。この無偏光ビームスプリッターによるsとpの反射率の差は、5%以下になっています。

### 金属コーティング

金属コーティングは、主にミラー用として用いられ、厳密な意味では薄膜ではありません。金属コーティングは、干渉効果では無く金属そのものの光学的性質を用いています。しかしながら、使いたい波長範囲や入射角での反射効率を高めるために、金属コーティング上に誘電体の薄膜を施す場合がよくあります。このような金属コーティングを「エンハンスド(増強型)」といいます。

金属膜の上に半波長分の厚みの硬い誘電体の単層保護膜を付けることで、光学特性をあまり劣化させないで、金属膜を摩耗と曇りから保護することができます。付ける誘電体の種類によって、ソフトコート、保護コート、およびハードコートに分類されます。

反射特性が広帯域で入射角と偏光状態に依存せず、廉価であることが、金属コーティングの主な利点です。誘電体コーティングに比べて、耐久性、反射特性、および耐損傷性で劣ります。



# 薄膜の生成

Thin Film Production

## 真空蒸着

CVIメレスグリオでは、真空蒸着法を用いて薄膜を蒸着しています。まず、 $10^{-6}$  トール ( torr ) またはそれ以上の真空度を実現できる大きな真空釜に、コーティングするための基板を入れます。図 5.21 に示すように、蒸着用の材料が釜の底に置かれます。基板は、何個か連なった回転木馬の様な載せ台にセットされます。載せ台は釜の中で惑星のように回転して、蒸着膜が基板に均等に付くように工夫されています

## 熱蒸散

蒸散に使われる材料として、2つのタイプがあります。1つは、古くからの方法で、タングステン、タンタル、またはモリブデン製の薄膜を折り曲げたもの ( ポート ) に大きな電流を流して抵抗加熱する方法です。少量の不揮発性のコーティング材料をポートに載せ、10 ~ 100 アンペアの大きな電流をポートに流して抵抗加熱すると、コーティング材料が熱で蒸散します。蒸着釜の内部が高い真空度に保たれていますので、蒸散した原子と分子は空

気分子に衝突することなく、釜の上部の基板に高密度のまままで到達し、基板表面に当たって固相になり、均一な薄膜を形成します。

熱蒸散の方法には、幾つかの問題点があります。有用な材料の中には、熱くなったポートと反応を起こすものがあります。この場合、反応による不純物がコーティングに混じるため、膜の光学特性が変わってしまいます。その上、金属酸化物のような融点が高いコーティング材料は、ポート材料が先に溶けてしまうため、この方法は使えません。酸化ジルコニウムのコーティングをするつもりが、タングステンの薄膜を蒸着してしまう結果になりかねません。

融点の低い材料に対しては、熱蒸散法が今でも使われています。温度を高く保った基板に蒸着した場合のコーティングの品質は、極めて優秀です。

## ソフトコーティング

電子銃による優れた方法が新たに開発されるまでは、2000 以下で熔ける材料しかコーティング材料に使えませんでした。都合の悪いことに、融解温度の低い材料による薄膜は、柔らかくて耐久性に問題が有ります。そのため、初期の多層膜コーティングは、経時劣化が大きくて、クリーニングの際は非常に注意を払う必要が有りました。熱蒸散法で使用可能な材料のみで、何種類かの波長で同時に仕様特性を満たす薄膜を作るにも、必要層数が大きくなると膜の柔らかい材料は先ず使えなくなるので、設計そのものが極めて難しくなります。

## 電子銃による方法

近年、電子銃を用いた光学薄膜生成法が主流になってきました。この方法を用いれば、酸化チタンや酸化ジルコニウムといった非常に蒸散し難い材料でもコーティング材料に使えます。大きな冷却されたるつぼを用いて、加熱された材料とるつぼが化合するのを阻止します。

水冷の銅製のつぼに入れられた十分な量の薄膜用材料に電子銃により10 kVで加速された1Aほどの強い電子流を叩き込みます。るつぼの中央部の薄膜用材料は局所的に熱せられて蒸散しますが、るつぼそのものは熱の影響を受けません。特に難融性の材料には、効果を高めるため電子ビームを材料上の一箇所に集束させるようにします。

熱蒸散法の場合と同じく、材料の蒸気がクラスターではなく原子や分子の状態になるように、装置中の温度と真空度を注意深く制御する必要があります。この方法による薄膜は、熱蒸散法に比べて、膜の均一性、光学特性および耐久性の点で優ります。

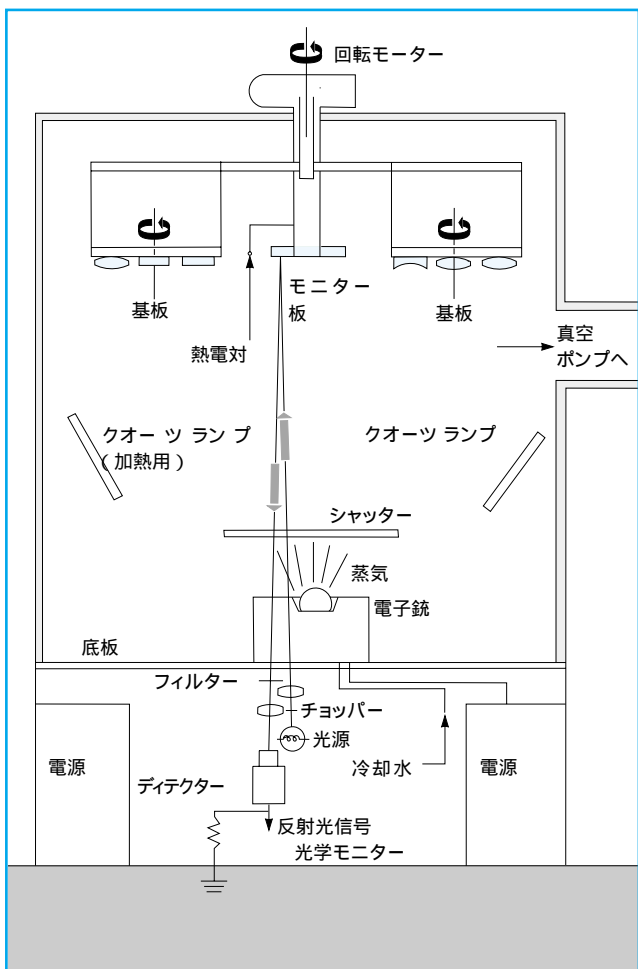


図 5.21 典型的な真空蒸着装置の概念図

### プラズマイオンアシスト電子銃撃法

プラズマイオンアシスト蒸着(PIAD)は、或る状況で極めて効果的なコーティング技術です。コーティング過程をイオンでアシストすることにより、薄膜層の原子や分子の充填率を高めることができます。このため、屈折率が高く機械的強度に優れた膜が得られます。

膜の充填率が高いということは、同時に水蒸気の吸収の影響を受けにくいことを意味します。薄膜が水蒸気を吸収すると、薄膜の屈折率が変化して光学特性も変わります。その上、水蒸気の吸収で薄膜の機械的特性が変化して膜の劣化を来たします。

イオンアシストコーティングは、コールドプロセスにも使えます。基板を昇温する必要がないので、アクロマートのような貼り合わせた光学部品にもコーティングが可能です。

### イオンビームスパッタリング( IBS )

イオンビームスパッタリングは、運動エネルギーの非常に高いイオンビームを使用する成膜方法です。ターゲットは、イオンエネルギーの独立的、自動的な制御が可能なイオン源の外にあります。イオンのエネルギーとフラックスは、基板上に直接スパッタリングされるターゲットの絶縁または導通のいずれかが可能な中性原子で構成され、これによりコーティングを幅広い用途に使用することができます。

高いエネルギーはターゲットにぶつかり、基板に向かって原子が放出されます。ダイレクトスパッタリングは、多くのコーティング工程において高いレベルの精度と再現性を提供します。IBS成膜は、吸湿による波長シフトを最小または排除し、吸収と散乱のほとんど無い高密度のコーティング層を得ることができます。さらに、コーティングの密度と耐久性が、損傷しにくい値の高いコーティングを可能とします。

### マグネトロンスパッタリング

マグネトロンスパッタリングは、ターゲットの表面近くを取り巻く磁場に自由電子を捕らえるためにカソードの後ろの磁石を利用する薄膜蒸着法です。イオンまたは中性粒子の計量されたガス状のプラズマが導入され、加速された電子はそれらの経路で中性気体原子と衝突します。これらの相互作用は、電離衝突を引き起こしガス原子から電子を取り除きます。ガス原子は平衡を失い、負荷電の電子より陽電荷の陽子を多く持つようになります。

陽電荷のイオンは陰電荷の電極に向かって加速され、ターゲットに衝突します。エネルギーの伝達がターゲットの結合エネルギーより大きくなり、自由電子が解き放たれ、ターゲット材を浸食し、その結果スパッタリングが引き起こされます。噴出したターゲット材の粒子は中性の電荷となり、従って負の磁場による影響を受けません。原子は、吸湿により起こる波長シフト

が少ないか全く無い、基板の密度の高いコーティングの層となります。自由電子の放出は、イオンの形成とプラズマの増殖を起こします。電離衝突の劇的な増加を引き起こす閉じ込められた自由電子の割合に近づくことにより、ターゲット材が浸食され基板上に堆積する成膜速度を非常に高くすることができます。

マグネトロンスパッタリングは、均一性に優れ、堆積率が高く、蒸着圧が低いという利点を持ち、基板温度が低いことから様々な工業製品に利用されています。

### 膜厚のモニタリングと制御

多層膜コーティング用の蒸着釜の中には、幾つかの蒸着源に種々のコーティング材料を予め装填してあり、蒸着釜を替えることなく多層膜の全ての層膜の蒸着ができます。

蒸着源が安定するまで、蒸着源を加熱するか電子銃を当てるかします。その後、蒸着源の上のシャッターを開けて、基板に気化したコーティング材料の蒸気を当てて蒸着を行いません。膜厚が所定の厚みに達すると、シャッターを閉じて蒸着源を切ります。他の層の膜材料の蒸着源でこのプロセスを繰り返します。

被膜の蒸着の様子をモニターするのに、通常は光学モニタリングの方法を用います。モニター光線を蒸着釜の中のモニター用のブランク基板に当てます。その反射光を光電子増倍管と位相に敏感な計測系を用いて検出します。

各層が参照用基板に蒸着されると、基板からの反射光の強度が正弦波のように周期的に変動します。1/4 波長と1/2 波長の膜厚のときに、反射強度が極小および極大となります。反射強度が適当な極値を取る時点で、蒸着を自動的に止めます。

### 散乱

薄膜の光学特性で通常もっとも重要なのは反射率と透過率で、その次が吸収率です。しかし、用途によっては、コーティングした光学部品の特性がコーティングによる光散乱によって制約される場合があります。散乱現象はかなり複雑ですが、散乱の大きかな度合いは、層の境界面の不完全部分に起因します。この不完全部分からの散乱の様子を図 5.22に示します。また、散乱は被膜の粒度にも関係します。被膜の粒度は、材料固有の性質のため制御は容易ではありませんが、蒸着条件を注意深く選ぶことで、この効果をかなり改善することができます。

特定の波長のヘリウムネオンレーザーや連続波長の色素レーザーなどの、ゲインの小さなレーザー用の内部共振器ミラーが、光散乱現象が重大なファクターとなる代表的な用途例です。

### 温度と内部応力

薄膜が問題を起こす一番大きな要因は、その固有の機械的応力です。蒸着源の温度を制御したり蒸着を施す基板の位置を最適化したりしても、大抵の蒸着膜は低い温度の基板には良く付



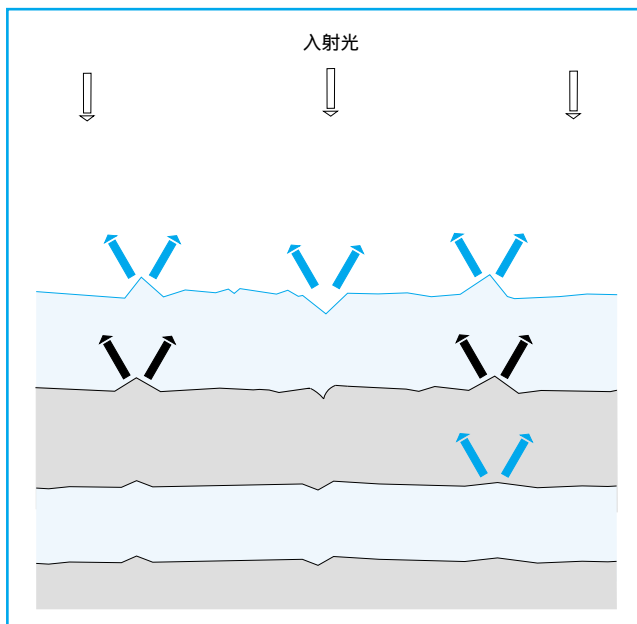


図 5.22 多層コーティング内の膜層境界面の不完全部分で散乱が起きる様子の概念図

### 固有内部応力

熱収縮による応力がない場合でも、膜の分子間力によって膜層が機械的に安定でなくなることも起こり得ます。大抵のコーティング材料では、均一な薄膜状態は安定した状態ではありません。自然の状態では、特定の対称性を持った結晶状態が、最もポテンシャルエネルギーの低い安定した状態で、この状態のときに内部分子間力が均衡を保っています。

層内の充填率が悪いと、内部分子間力だけではなく内部応力も発生します。充填率が100%から大きく下回ると、分子間力による結合が弱まって、膜が実用に耐えないほど弱くなります。

### 製造時の制御

特定の仕様を満たすコーティングを実際にするためのファクターが2つあります。第1に、設計が適切であることです。設計段階でコーティングの振る舞いが正確に予見できないと、実際に製造してもまず満足なコーティングが得られません。また、製造の段階を注意深く制御できないと、でき上がったコーティングは設計通りのものと相当かけ離れた特性になってしまいます。

CVIメレズグリオでは、最新のコンピューターシミュレーションプログラムを用いて、何度も追計算をして最適化の確認を取れたものを最終設計としています。高品質の薄膜を製造するのは易しいことではありません。CVIメレズグリオでは、生産工程の中でも薄膜製造工程のモニタリングを最も重視しています。モニタリングを正確に行なわない限り、いくらコーティングの設計が良くても何もならないからです。

コーティング製造の各工程ごとに、以下のような十分な注意が払われています。前洗浄や制御された冷まし工程などに十分な注意を払うばかりではなく、製造工程の隅々にまで注意を行き届かせて製造しています。当社は、このように製造の全ての工程に管理を行き届かせて最善の努力を払っており、お客様に十分納得していただける高い仕様の製品を高品質で供給致します。

### 品質管理

CVIメレズグリオのコーティングは、全てのバッチについてその品質が徹底的に検査されます。製造工程に十分な注意を払って作られた仕上がり品をさらに検査して、一番高い品質の製品のみを出荷に廻します。

当社の検査システムは、厳格なMIL-I-45208Aの規格に則っており、当社の分光光度計は、NIST標準で校正されています。MIL-C-675およびMIL-M-13508の環境および光量試験のご要望にもお応えできます。信頼性と精度についての保証も致します。

きません。不揮発性の材料では特にそうです。基板を数百度に昇温してコーティングすると、薄膜の品質が良くなり、低温蒸着では使えなかった薄膜も実用に耐える品質になります。基板を昇温することで、新たに蒸着した原子・分子が表面を少しは拡散できるようになるからです。

昇温した基板に多層膜コーティングを施した後、非常にゆっくりと常温にまで戻す必要があります。基板と薄膜の熱膨張率が異なるからです。基板温度が下がると薄膜が収縮して層の中に応力が貯まります。材料の化学的性質の違いや充填特性の違いなどの理由で、隣接する薄膜同士が上手く付かない場合があります。

温度による応力と膜層境界面の結合力の弱化の現象のために、光学薄膜の厚みが制限されます。イオンアシスト蒸着法などの新しい蒸着技術が生産ラインに導入されるようになるまでは、コーティング全体の厚みを制限したり生産工程を注意深く制御したりして、コーティングの残留応力を小さくすることが必要でした。

# 減反射コーティング

Antireflection Coatings

## 広帯域多層膜減反射コーティング

広帯域減反射コーティングは、広いスペクトルバンド幅にわたって非常に低い反射率を得ることができます。これらの先進的な多層膜は、広いスペクトル範囲にわたって非常に低いレベルに反射率を抑えるよう設計されています。

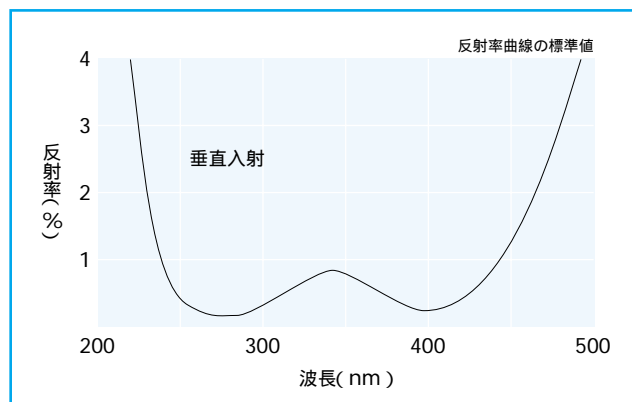
CVIメレスグリオでは、HEBBAR™とBBARの2つのシリーズの広帯域減反射コーティングをご用意しています。

### HEBBAR™ コーティング

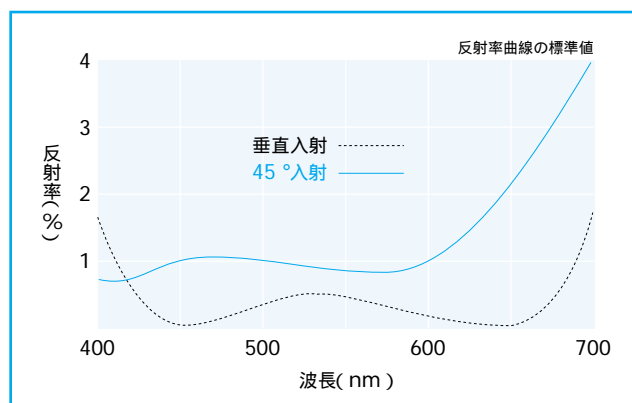
ヒバー(HEBBAR)コーティングは、約250 nm以上のスペクトル域をカバーし、2つの波長において反射率が最小となる特性曲線を有しています。この波長範囲における標準の反射率は0.6%であり、1.0%を超えることはありません。2つのピーク中心のより限定的な波長域においては、反射率は0.4%を下回ります。HEBBARコーティングは、入射角度に対してあまり敏感ではありませんが、垂直入射に対して入射角が大きくなる事により反射率曲線が短波長側に若干シフトし、長波長側の反射率がわずかに増える傾向があります。このコーティングは、開口数の大きい(Fナンバーの小さい)レンズや曲率のきつい曲面に対して非常に適しています。このようなレンズでは、有効径内において入射角が大きく変化します。

以下に示す標準的な反射率曲線は、フューズドシリカ製の基盤や光学部品に施される紫外線用の245 ~ 440 nm および 300 ~ 500 nm のコーティングを除き、BK7製の基板に対するものです。これらの反射率の値は、屈折率が1.47 ~ 1.55の範囲である基盤に対して当てはまります。他の屈折率を持つ基板では、それに合わせて最適化された設計が必要となりますが、0 ~ 15°の入射角においては約20%、30°以上の入射角においては25%の反射率の増加が見込まれます。

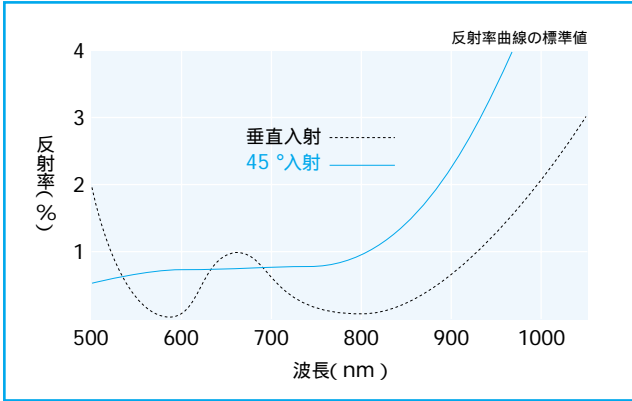
HEBBARコーティングをご注文の際には、後述する表に示されるコーティング番号を製品番号に追記してください。場合によっては、コートが施される面を具体的に特定する必要があります。



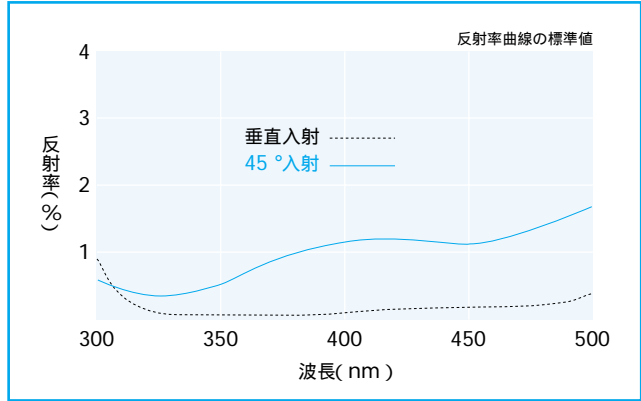
HEBBAR™ コーティング、245 ~ 440 nm用  
 $R_{平均} < 0.5\%$ 、 $R_{最大} < 1.0\%$   
 損傷しきい値：3.5 J/cm<sup>2</sup>、10 nsec  
 (パルス@355 nm、標準値)



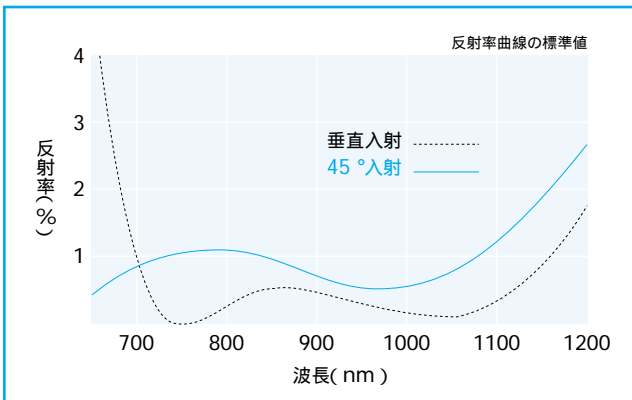
HEBBAR™ コーティング、415 ~ 700 nm用  
 $R_{平均} < 0.4\%$ 、 $R_{最大} < 1.0\%$   
 損傷しきい値：3.8 J/cm<sup>2</sup>、10 nsec  
 (パルス@532 nm、標準値)



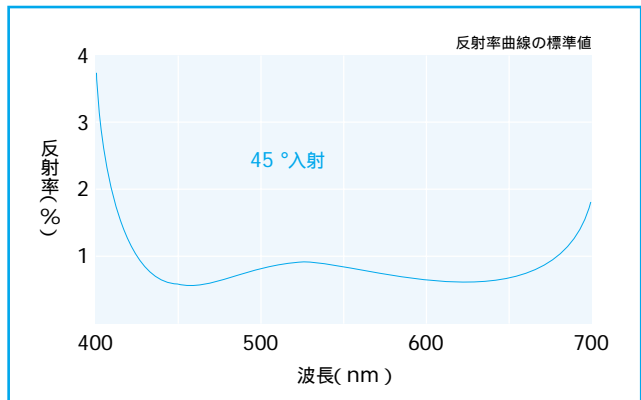
HEBBAR™ コーティング、780 ~ 850 nm用の  
ダイオードレーザー用  
R<sub>平均</sub> < 0.25 %、R<sub>最大</sub> < 0.4 %  
損傷しきい値：6.5 J/cm<sup>2</sup>、20 nsec  
(パルス@1064 nm、標準値)



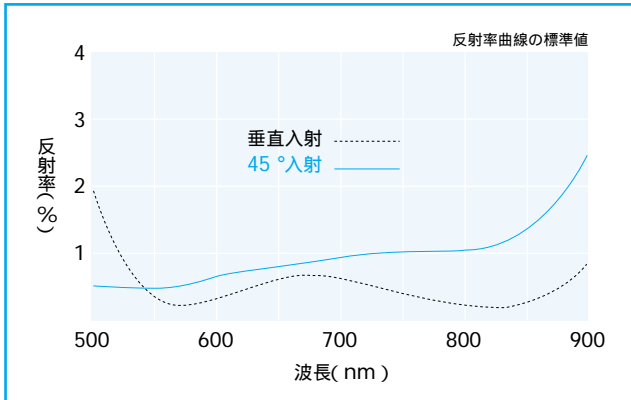
スペシャルHEBBAR™ コーティング、300 ~ 500 nm用  
R<sub>最大</sub> < 1.0 %  
損傷しきい値：3.2 J/cm<sup>2</sup>、10 nsec  
(パルス@355 nm、標準値)



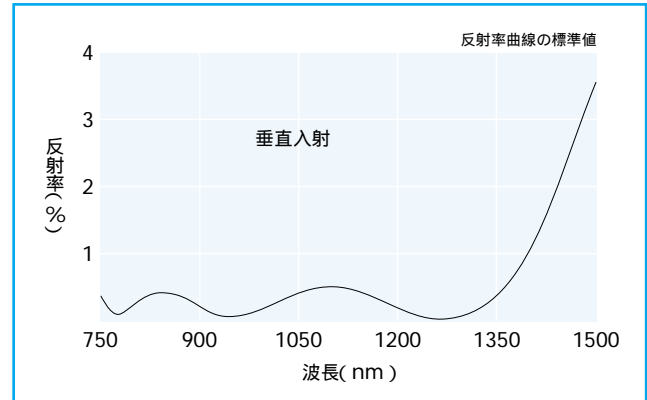
HEBBAR™ コーティング、750 ~ 1100 nm用  
R<sub>平均</sub> < 0.4 %、R<sub>最大</sub> < 0.6 %  
損傷しきい値：6.5 J/cm<sup>2</sup>、20 nsec  
(パルス@1064 nm、標準値)



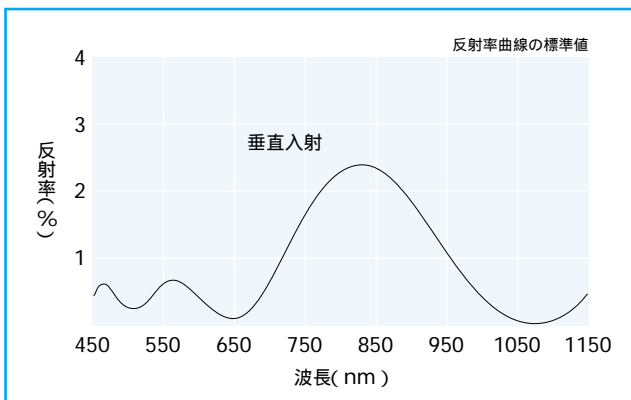
スペシャルHEBBAR™ コーティング、425 ~ 670 nmの  
45°入射用  
R<sub>平均</sub> < 0.6 %、R<sub>最大</sub> < 1.0 %  
損傷しきい値：3.8 J/cm<sup>2</sup>、10 nsec  
(パルス@532 nm、標準値)



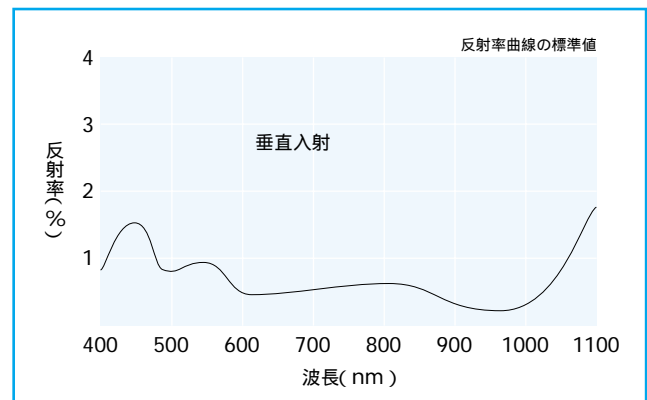
スペシャルHEBBAR™コーティング、660～835 nmの  
ダイオードレーザー用  
R平均 < 0.5 %、R最大 < 1.0 %  
損傷しきい値：3.8 J/cm<sup>2</sup>、10 nsec  
(パルス@532 nm、標準値)



2波長用HEBBAR™コーティング、  
780～830 nmおよび1300 nm用  
R最大 < 0.5 % (@780～830 nmおよび1300 nm)  
損傷しきい値：5.4 J/cm<sup>2</sup>、20 nsec  
(パルス@1064 nm、標準値)



2波長用HEBBAR™コーティング、  
450～700 nmおよび1064 nm  
R最大 < 1.25 % (@450～700 nm)  
R最大 < 0.25 % (@1064 nm)  
損傷しきい値：  
1.3 J/cm<sup>2</sup>、10 nsec (パルス@532 nm、標準値)  
5.4 J/cm<sup>2</sup>、20 nsec (パルス@1064 nm、標準値)



拡張HEBBAR™コーティング、420～1100 nm用  
R平均 < 1.0 %、R最大 < 1.75 %  
損傷しきい値：  
4.5 J/cm<sup>2</sup>、10 nsec (パルス@532 nm、標準値)  
6.5 J/cm<sup>2</sup>、20 nsec (パルス@1064 nm、標準値)

### 標準 HEBBAR™ コーティング

内容	波長域 (nm)	反射率 (%)	入射角 (°)	コーティング番号	
				旧番号	新番号
245 ~ 440 nm用 HEBBAR™	245 ~ 440	R <sub>平均</sub> < 0.50	0	/072	HE-245-440
415 ~ 700 nm用 HEBBAR™	415 ~ 700	R <sub>平均</sub> < 0.40	0	/078	HE-415-700
780 ~ 850 nm用 HEBBAR™	780 ~ 850	R <sub>平均</sub> < 0.25	0	/076	HE-780-850
750 ~ 1100 nm用 HEBBAR™	750 ~ 1100	R <sub>平均</sub> < 0.40	0	/077	HE-750-1100

旧メスグリオ製品番号は、新たなCVIメスグリオ製品番号に置き換わります。

### スペシャル HEBBAR™ コーティング、OEMおよびプロトタイプ用途向け

内容	波長域 (nm)	反射率 (%)	入射角 (°)	コーティング番号	
				旧番号	新番号
300 ~ 500 nm用 HEBBAR™	300 ~ 500	R <sub>最大</sub> < 1.0	0	/074	HE-300-500
425 ~ 670 nm用 HEBBAR™	425 ~ 670	R <sub>平均</sub> < 0.60	45 無偏光	/079	HE-425-675-45UNP
660 ~ 835 nm用 HEBBAR™	660 ~ 835	R <sub>平均</sub> < 0.50	0	/075	HE-660-835

旧メスグリオ製品番号は、新たなCVIメスグリオ製品番号に置き換わります。

### 2波長帯 HEBBAR™ コーティング

内容	波長域 (nm)	反射率 (%)	入射角 (°)	コーティング番号	
				旧番号	新番号
450 ~ 700 nm および1064 nm用 HEBBAR™	450 ~ 700 /1064	R <sub>平均</sub> < 0.60	0	/083	HE-450-700/1064
780 ~ 830 nm および1300 nm用 HEBBAR™	780 ~ 830 /1300	R <sub>平均</sub> < 0.40	0	/084	HE-780-830/1300

旧メスグリオ製品番号は、新たなCVIメスグリオ製品番号に置き換わります。

### 拡張広帯域 HEBBAR™ コーティング

内容	波長域 (nm)	反射率 (%)	入射角 (°)	コーティング番号	
				旧番号	新番号
420 ~ 1100 nm用 HEBBAR™	420 ~ 1100	R <sub>平均</sub> < 0.50	0	/073	HE-420-1100

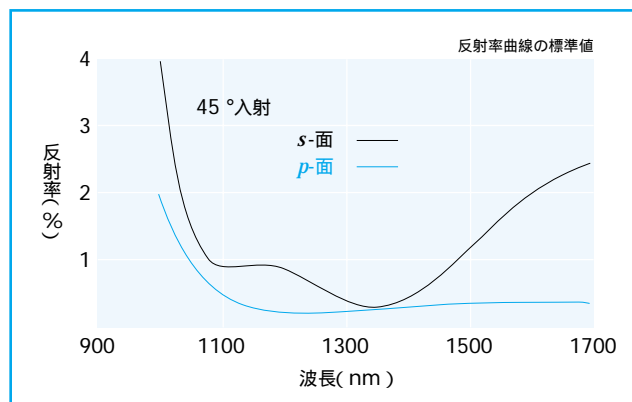
旧メスグリオ製品番号は、新たなCVIメスグリオ製品番号に置き換わります。



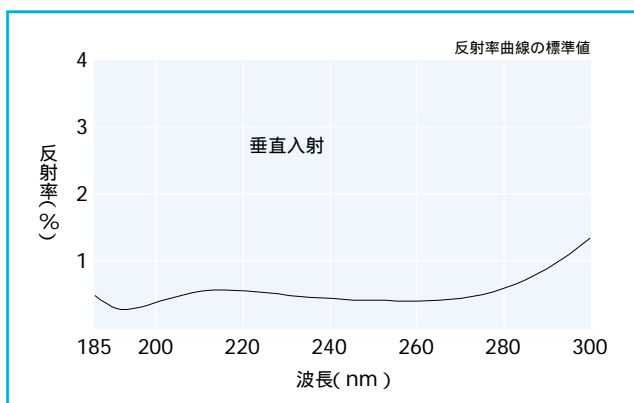
### BBAR シリーズのコーティング

CVIメレスグリオでは、193 nm ~ 1600 nmの範囲をカバーし、それぞれがオーバーラップするよう設計された6種類の広帯域減反射コーティング(BBAR)コーティングをご用意しています。これには、Ti: サファイアの領域全体の非常に広い範囲が含まれます。BBARコーティングは、非常に広い範囲における0.5%以下の低い平均反射率と、パルスおよび連続発振レーザー光源に対する高い損傷しきい値[10J/cm<sup>2</sup>、20ns、20Hz (パルス@1064 nm) および1 MW/cm<sup>2</sup> (CW@1064 nm)]の双方を有するフォトニクス産業において他に類を見ないものです。標準的な特性曲線については、標準の波長範囲を示した個々のグラフをご参照ください。もし標準の設計ではアプリケーションをカバーできない場合、CVIメレスグリオではそのアプリケーションに合わせた特別な広帯域減反射コーティングを提供する事ができます。

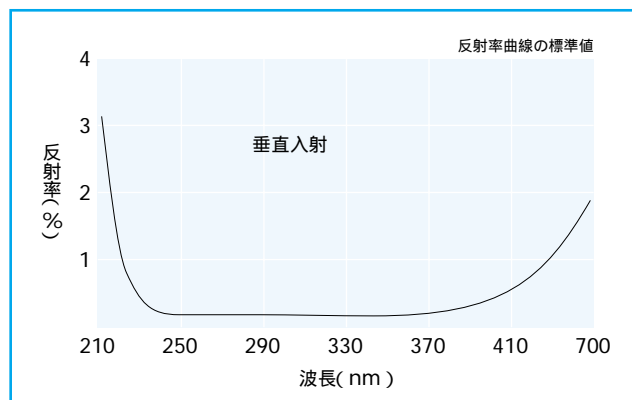
CVIメレスグリオでは、2.0 μm ~ 12.0 μmに対応する中間赤外および遠赤外用広帯域減反射コーティングをご用意しています。これらのコーティングは、Si、Ge、ZnS、ZnSe、またはCaF<sub>2</sub>を含む多岐にわたる基板材質に施すことが可能です。標準のコーティングは、2 ~ 2.5 μm、3 ~ 5 μm、および8 ~ 12 μmの領域をカバーしますが、特注コーティングでは中間赤外および遠赤外のアプリケーションにもご利用いただけます。



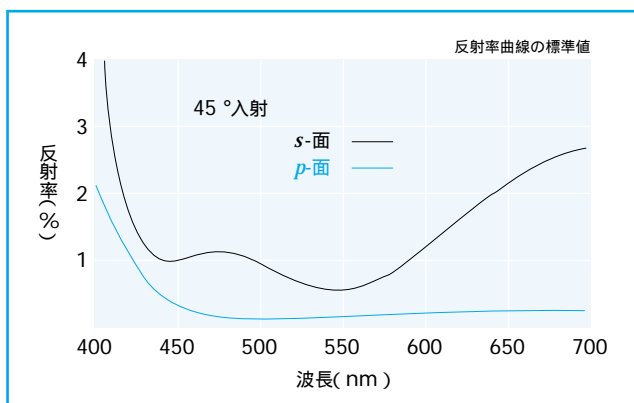
BBAR/45コーティング、1050 ~ 1600 nmのNIR 領域用 (45°入射)



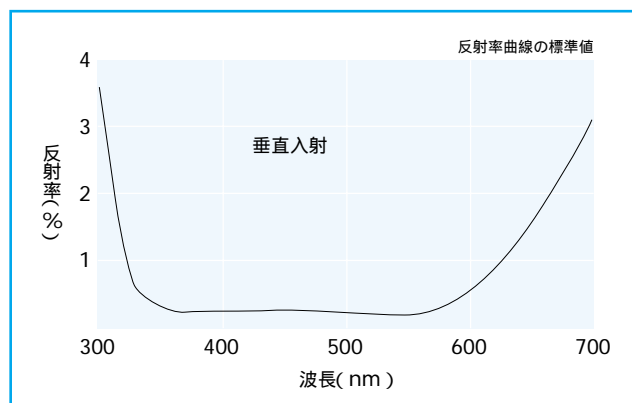
BBARコーティング、193 ~ 248 nmのUV 領域用 (0°入射)



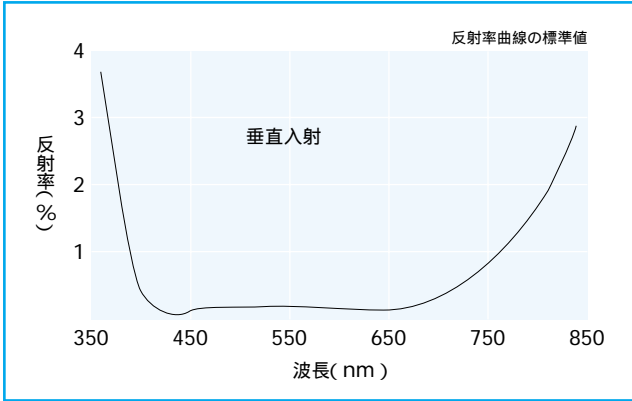
BBARコーティング、248 ~ 355 nmのUV領域用 (0°入射)



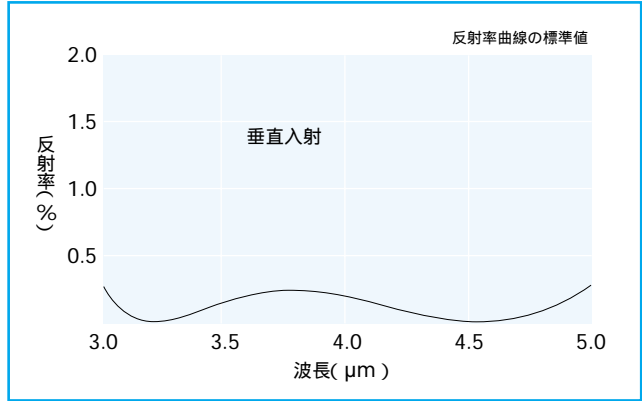
BBAR/45コーティング、425 ~ 675 nmの可視域用 (45°入射)



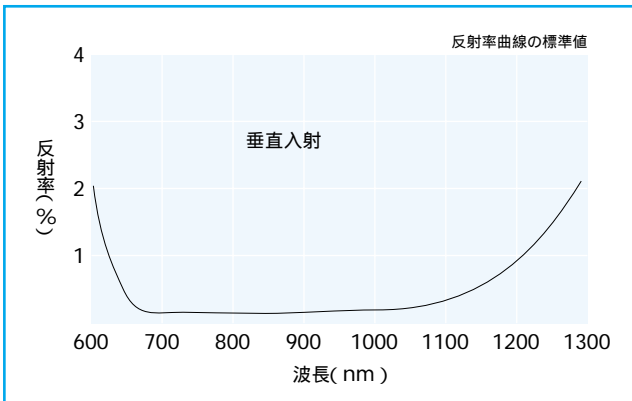
BBARコーティング、355 ~ 532 nmのUV領域用 (0°入射)



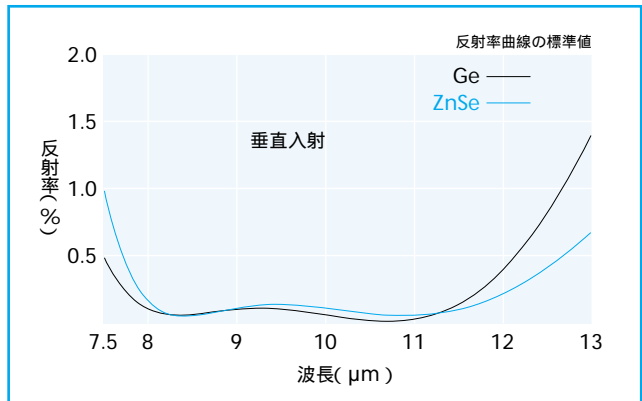
BBARコーティング、425 ~ 675 nmのVISおよびNIR 領域用 (0°入射)



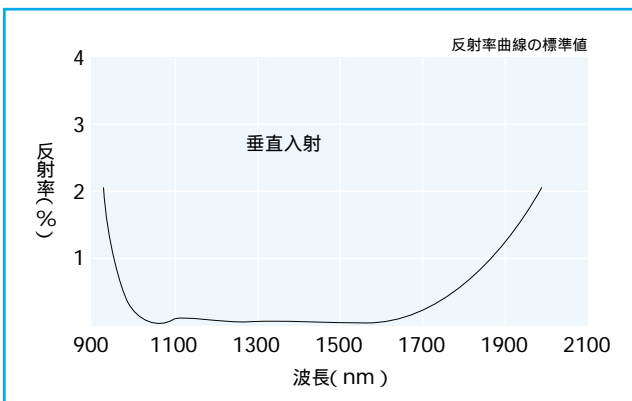
BBARコーティング、3500 ~ 5000 nmのIR 領域用 (0°入射)



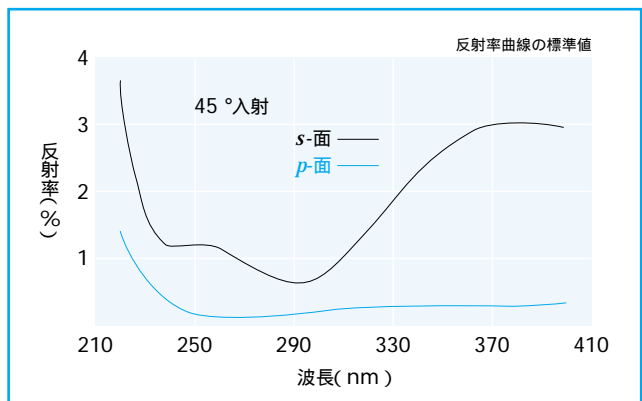
BBARコーティング、670 ~ 1064 nmのVISおよびNIR 領域用 (0°入射)



BBARコーティング、8000 ~ 12000 nmのIR 領域用 (0°入射)



BBARコーティング、1064 ~ 1600 nmのVISおよびNIR 領域用 (0°入射)



BBAR/45コーティング、248 ~ 355 nmのUV 領域用 (45°入射)

## V-コーティング

CVIメレスグリオのV-タイプAR コーティングは、単一または複数のレーザー波長、近接した波長用として優れています。例として、アルゴンレーザーの基本発振ラインである488 nm および515 nm、ネオジウムが様々なホスト材料の中で遷移する際の1047 ~ 1064 nm、およびエキシマレーザーの個々の発振ラインが挙げられます。

CVIメレスグリオでは、193 nm ~ 10.6 μmの波長用のV-タイプAR コーティングをご用意しています。

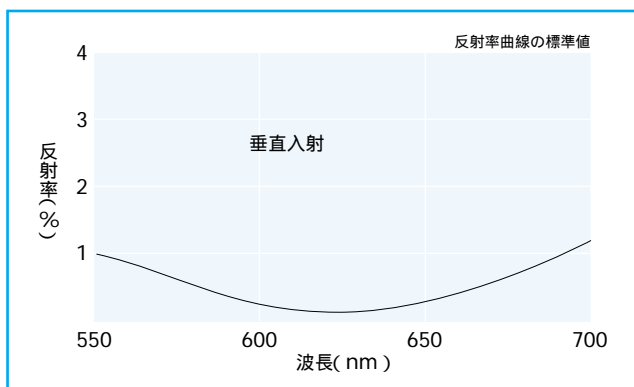
フューズドシリカ、水晶、スプラシル(Suprasil)、およびBK7に施されたV-タイプAR コーティングは、15 J/cm<sup>2</sup> @1064 nm、20 ns、20Hzの損傷しきい値を有しています。通常の性能では、しばしば20 J/cm<sup>2</sup> を超えることも可能です。

SF11および同等のガラスに施されたAR コーティングの損傷しきい値は、コーティングによって制限されるのではなく、大部分の材質の特性により制限されます。損傷テストにおけるSF11および同等のガラスの損傷しきい値は、4 J/cm<sup>2</sup>を示しています。

ご注文の際には、以下の項目について特定をしてください。

- 波長
- 基板材質
- 入射角度
- 偏光
- エネルギー密度(J/cm<sup>2</sup>)

632.8 nm用に設計され、BK7ガラスに施された標準のV-コーティングの反射率曲線は、下記のグラフを参照してください。



### 632.8 nm用 V-コーティングの例

- 単一指定した波長と入射角度においてゼロに近い反射率
- 最大反射率が0.1%以下となる場合もあり
- ほとんどのレーザーライン用に標準コーティングをご用意
- 特定の入射角における中心波長の特注が可能

0°入射用に設計された標準のV-コーティングについては、下記の表を参照してください。

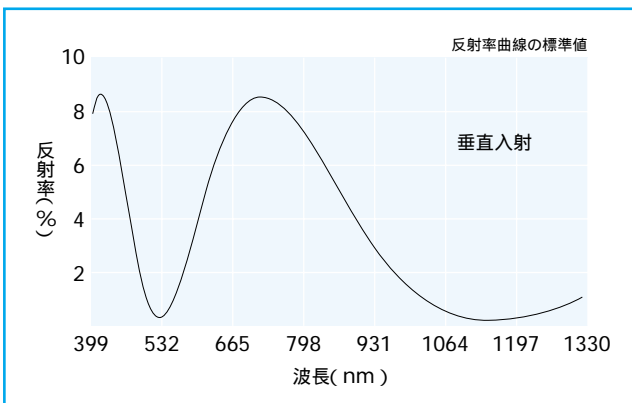
### V-コーティングの中心波長

波長 (nm)	レーザーのタイプ	最大反射率 (%)	コーティング番号	
			旧番号	新番号
193	ArF	0.5	/101	193-0
248	ArF	0.25	/102	248-0
266	Ndの第3高調波	0.25	/103	266-0
308	XeCl	0.25	/104	308-0
351	Ar イオン	0.25	/105	351-0
364	Ar イオン	0.25	/107	364-0
442	HeCd	0.25	/111	442-0
458	Ar イオン	0.25	/112	458-0
466	Ar イオン	0.25	/113	466-0
473	Ar イオン	0.25	/114	473-0
476	Ar イオン	0.25	/115	476-0
488	Ar イオン	0.25	/116	488-0
496	Ar イオン	0.25	/117	496-0
502	Ar イオン	0.25	/118	502-0
514	Ar イオン	0.25	/119	514-0
532	Ndの第2高調波	0.25	/122	532-0
543	HeNe	0.25	/121	543-0
633	HeNe	0.25	/123	633-0
670	GaAlAs	0.25	/128	670-0
694	ルビー	0.25	/124	694-0
780	GaAlAs	0.25	/163	780-0
830	GaAlAs	0.25	/166	830-0
850	GaAlAs	0.25	/167	850-0
904	GaAs	0.25	/125	904-0
1064	Nd	0.25	/126	1064-0
1300	InGaAsP	0.25	/168	1300-0
1523	HeNe	0.25	/169	1523-0
1550	InGaAsP	0.25	/169	1550-0

旧メレスグリオ製品番号は、新たなCVIメレスグリオ製品番号に置き換わります。

### ダブル-Vおよびトリプル-Vコーティング

CVIメレスグリオでは、Nd:YAGレーザー向けの垂直入射用ダブル-Vおよびトリプル-Vコーティングをご用意しています。高い損傷しきい値を持つ電子ビーム蒸着された誘電体は、もっぱらコーティング材料として使用されています。下記のグラフが示すように、高調波における減反射のピークは非常に狭くなっています。また、コーティング設計や分散により、波長の比が正確に1:1/2:1/3の位置と一致していません。従って、これらのARコーティングの反射率の仕様は、いずれか1つの波長用のVコーティングほど良好ではありません。CVIメレスグリオでは、このコーティングをW2シリーズの全ての標準サイズのウィンドウに施すことができます。45°入射のダブル-Vおよびトリプル-V ARコーティングの特性、もしくは他の高調波の組み合わせについては、CVIメレスグリオまでお気軽にお問合せください。



ダブル-V 減反射コーティング、532 nmおよび1064 nm用

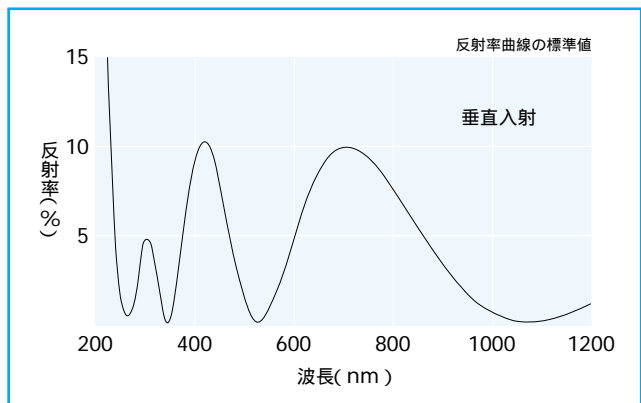
垂直入射用に設計

$R < 0.3\%$  (@1064 nm)

$R < 0.6\%$  (@532 nm)

損傷しきい値: 5 J/cm<sup>2</sup> (@532 nm)

損傷しきい値: 10 J/cm<sup>2</sup> (@1064 nm)



トリプル-V 減反射コーティング、355 nm、532 nm、および1064 nm

垂直入射用に設計

$R < 0.3\%$  (@1064 nm)

$R < 0.6\%$  (@532 nm)

$R < 1.5\%$  (@355 nm)

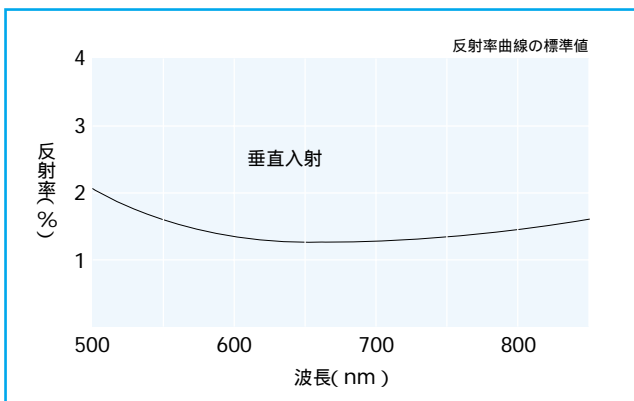
### 単層 MgF<sub>2</sub> コーティング

屈折率が理想的( 1.38@550 nm )で耐久性が高い事から、フッ化マグネシウム( MgF<sub>2</sub> )は単層減反射コーティングの材料として一般的に使用されています。このコーティングは550 nmの垂直入射用に最適化されていますが、その反射率曲線から分かるように波長と入射角度に対して敏感ではありません。

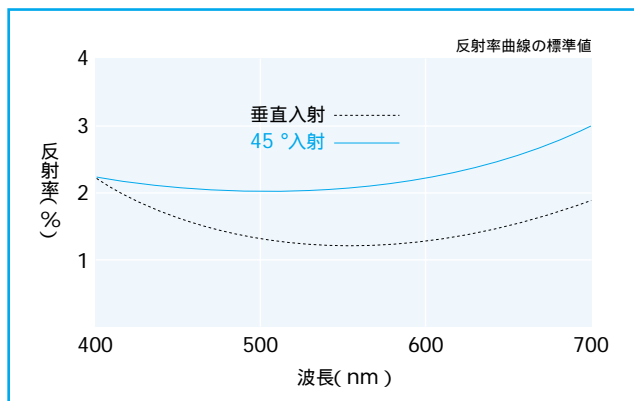
非常にきつい曲面や曲率半径の短い曲面に単層減反射コーティングを施す場合、面に対する入射角度のおおよそ半分の角度を指定します。

### 単層 MgF<sub>2</sub> 減反射コーティング、垂直入射

波長範囲 (nm)	BK7における最大反射率 (%)	フューズドシリカにおける最大反射率 (%)	コーティング番号
400-700	2.0	2.25	SLMF-400-700
520- 820	2.0	2.25	SLMF-520-820



単層 MgF<sub>2</sub> コーティング、520 ~ 820 nm用



単層 MgF<sub>2</sub> コーティング、400 ~ 700 nm用

- 670 nm、垂直入射用に最適化
- 可視および近赤外ダイオードレーザーのほとんどの波長に有用
- 耐久性が高く、入射角に敏感でない
- 損傷しきい値： 13.2 J/cm<sup>2</sup>、10 nsec (パルス@532 nm、標準値)

- 可視波長域の減反射コーティングとして一般的で多機能
- 耐久性が高く、最も経済的
- 550 nm、垂直入射用に最適化
- 入射角の変化に比較的敏感ではない
- 損傷しきい値： 13.2 J/cm<sup>2</sup>、10 nsec (パルス@532 nm、標準値)



# 高反射コーティング

High-Reflection Coatings

## 金属膜高反射コーティング

CVIメスグリオでは、真空蒸着により形成される8種類の金属膜高反射コーティングをご用意しています。これらのコーティングはあらゆる入射角度に使用することができ、ほとんどの光学部品に施す事が可能です。このコーティングを指定する場合には、製品番号にコーティング番号を追記してください。

金属膜反射コーティングはデリケートで、クリーニングの際には注意が必要です。誘電体をオーバーコーティングすることにより傷に対する耐性を改善する事はできますが、研磨するようなクリーニング方法には耐えることができません。塵や埃は、清潔で乾燥した圧縮ガスにより吹き飛ばす事ができます。その後、脱イオン化水、中性洗剤、またはアルコールを使用して非常に優しく清掃します。適切な綿棒による優しい清掃が効果的です。

## CVIメスグリオのコーティングチャンバー

CVIメスグリオの薄膜真空蒸着装置には、以下のような能力が備わっています。

- 複数の電子ビーム源が備わる
- 光学式と水晶式の膜厚制御
- 残留ガスの分析機能
- マスフロー(ガス流量)制御
- 基板加熱ヒーター
- 複合プラネタリー回転機能

## 金属膜高反射コーティング

コーティングのタイプ	波長範囲 (nm)	平均反射率 (%)	損傷しきい値*		旧コーティング番号	製品コード
			パルス(J/cm <sup>2</sup> )	CW(MW/cm <sup>2</sup> )		
真空紫外用アルミニウム	157	> 80	テストされていない	テストされていない		VUVA
深紫外用アルミニウム	193	> 90	テストされていない	テストされていない		DUVA
紫外用エンハンスドアルミニウム	250 ~ 600	85	0.3	22.0	/028	PAUV
保護膜付きアルミニウム	400 ~ 10,000	90	0.5	22.0	/011	PAV
エンハンスドアルミニウム	450 ~ 650	92	0.3	12.0	/023	EAV
保護膜付き銀	400 ~ 20,000	95	1.6	73.0	/038	PS
保護膜付き金	650 ~ 10,000	95	0.4	17.0	/055	PG
金	700 ~ 20,000	99	1.1	48.0	/045	PG-BARE

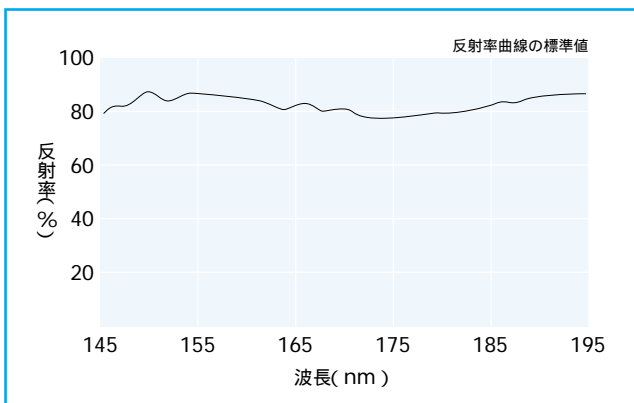
\* PAUVコーティング : 10 nsec(パルス@355 nm) その他 : 20 nsec(パルス@1064 nm、標準値)

## CVIメスグリオの最先端のコーティング能力

CVIメスグリオの光学素子製造拠点では、以下の写真のような薄膜蒸着システムが稼働しています。



### 真空紫外用アルミニウム(VUVA)



157 nmにおいて優れた特性

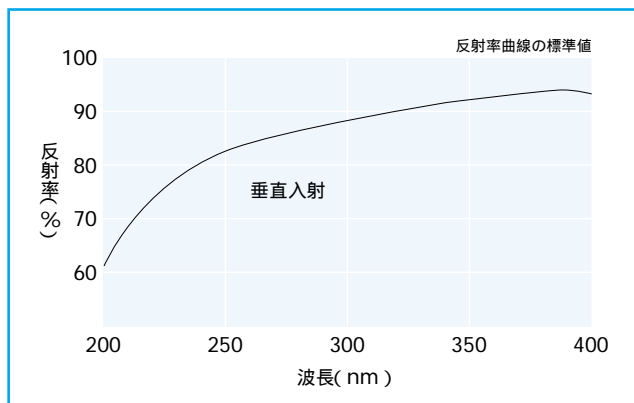
真空紫外、可視、近赤外領域にわたって高い反射率が得られる

誘電体のオーバーコートが酸化を最小にし、傷への耐性を高める

$R > 80 \% @ 157 \text{ nm}$

CVIメレスグリオの高密度アルミニウムコーティング技術を基に製造されるVUVAミラーは、157 nmでの特性が最適化されています。波長における性能証明は、特注にて承ります。詳細は、CVIメレスグリオまでお問合せください。

### 紫外用保護膜付きアルミニウム(PAUV)



紫外領域での反射率を維持

誘電体のオーバーコートが酸化を最小にし、傷への耐性を高める

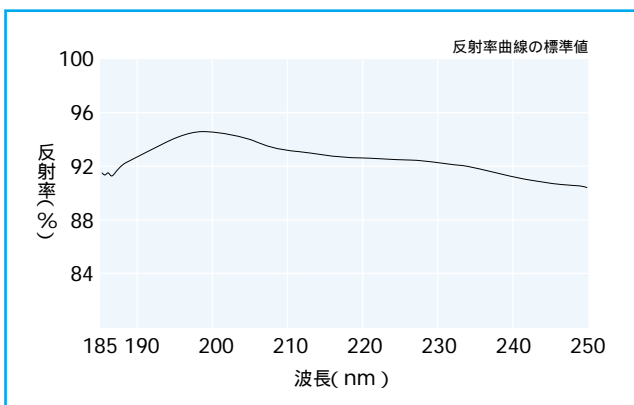
$R_{\text{avg}} > 86 \% @ 250 \sim 400 \text{ nm}$

$R_{\text{avg}} > 85 \% @ 400 \sim 700 \text{ nm}$

損傷しきい値:  $0.07 \text{ J/cm}^2$ , 10 nsec パルス ( $5.7 \text{ MW/cm}^2$ )@355 nm、標準値

誘電体の保護膜が酸化を防ぎ、傷に対する耐性を高めます。保護膜付きアルミニウムの表面には傷が付き難いとはいえ、クリーニングには注意が必要です。

### 深紫外用アルミニウム(DUVA)



193 nmにおいて優れた特性

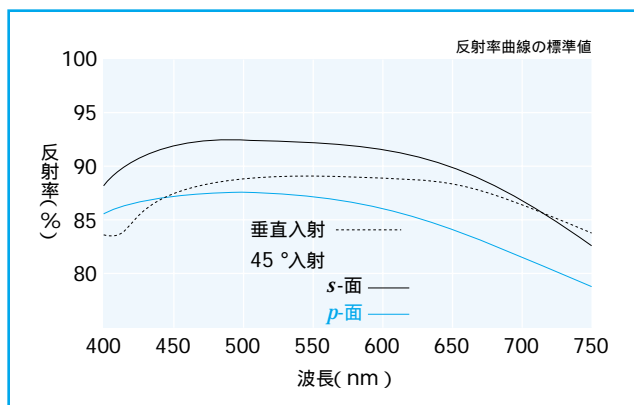
真空紫外、可視、近赤外領域にわたって高い反射率が得られる

誘電体のオーバーコートが酸化を最小にし、傷への耐性を高める

$R > 90 \% @ 193 \text{ nm}$ ,  $R_{\text{avg}} 85 \% @ 400 \sim 1200 \text{ nm}$

CVIメレスグリオの高密度アルミニウムコーティング技術を基に製造される広帯域DUVAミラーは、標準の保護膜付きUVアルミミラーに比べ、193 nmにおける反射率と耐久性が高くなっています。エリブソメータ、分光計、および半導体リソグラフィや度量衡のアプリケーションに適したミラーをカタログ製品から選ぶ事ができます。

### 保護膜付きアルミニウム(PAV)



可視から近赤外域において最も汎用性の高い金属反射膜

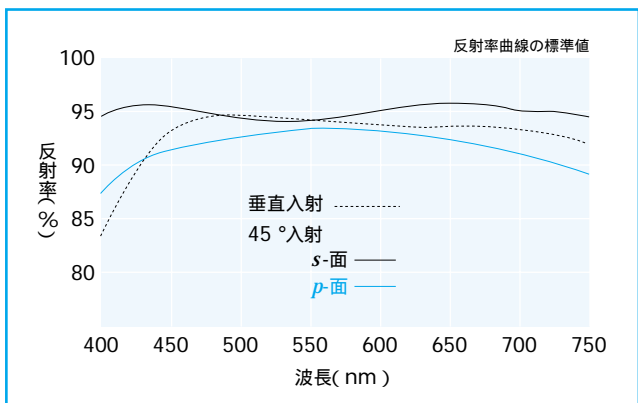
保護膜がミラーの寿命を延ばし、表面を保護

$R_{\text{avg}} > 90 \% @ 400 \text{ nm} \sim 10.0 \mu\text{m}$

損傷しきい値:  $0.3 \text{ J/cm}^2$ , 10 nsec パルス ( $21 \text{ MW/cm}^2$ )@532 nm、標準値。  $0.5 \text{ J/cm}^2$ , 20 nsec パルス ( $22 \text{ MW/cm}^2$ )@1064 nm、標準値

保護膜付きアルミニウムは、可視および近赤外波長域の外部反射用として最良の汎用金属膜コーティングです。保護用の皮膜が酸化を阻止し、高い反射率を維持します。また保護膜は、アルミニウムコーティングを小さな傷から守るための十分な耐久性を有しています。

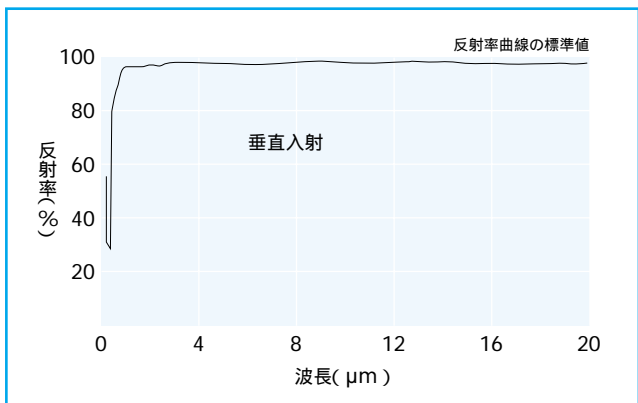
### エンハンスドアルミニウム(EAV)



可視域中央での優れた特性  
 保護膜付きアルミニウムの耐久性を有する  
 $R_{avg} > 92\%$  @450 ~ 650 nm  
 損傷しきい値 : 0.4 J/cm<sup>2</sup>, 10 nsec パルス (33 MW/cm<sup>2</sup>)  
 @532 nm, 標準値。0.3 J/cm<sup>2</sup>, 20 nsec  
 パルス (12 MW/cm<sup>2</sup>) @1064 nm, 標準値

アルミニウムに誘電体多層膜をコーティングすることにより、  
 広範囲の波長における反射率を改善しています。このコーティ  
 ングは、保護膜付きアルミニウムの耐久性と信頼性と共、中  
 間可視領域でのより高い反射率を必要とする用途に大変適し  
 ています。

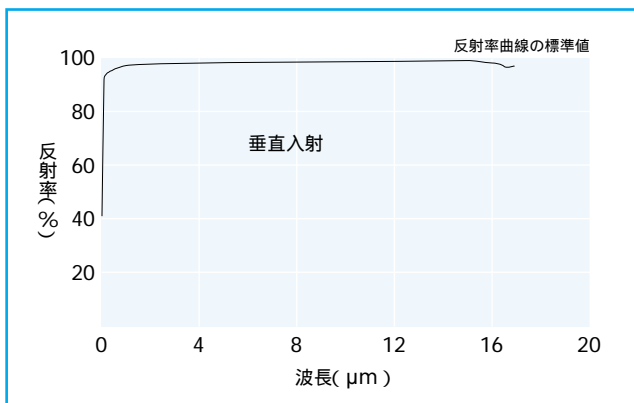
### 保護膜付き銀(PS)



非常に多機能なミラーコーティング  
 可視から近赤外域において優れた特性を有する  
 $R_{avg} > 95\%$  @400 nm ~ 20 μm  
 Ti:サファイアレーザーの超短パルスへの使用が可能  
 損傷しきい値 : 0.9 J/cm<sup>2</sup>, 10 nsec パルス (75 MW/cm<sup>2</sup>)  
 @532 nm, 標準値。1.6 J/cm<sup>2</sup>, 20 nsec  
 パルス (73 MW/cm<sup>2</sup>) @1064 nm, 標準値

CVIメスグリオ独自のコーティングでありエッジシール技術  
 を用いた表面反射保護膜付き銀コーティングです。この保護  
 膜付き銀コーティングでは、52フェムト秒のパルス幅が反射  
 により広がらない事を最新のテストで確認しています。これ  
 は、フェムト秒の用途に使用可能な性能を有する事を示して  
 いますが、保証するものではありません。

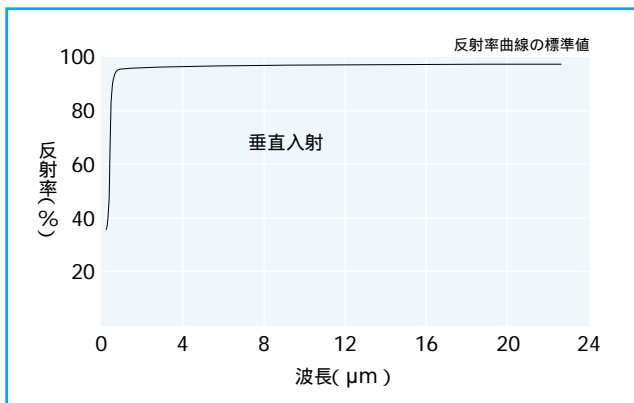
### 保護膜付き金 (PG)



コーティングの寿命を延ばす保護膜付き  
 $R_{avg} 95.0\%$  @650 nm ~ 10 μm  
 損傷しきい値 : 0.4 J/cm<sup>2</sup>, 20 nsec パルス  
 (17 MW/cm<sup>2</sup>) @1064 nm, 標準値

金本来の波長特性と硬質誘電体の耐久性を併せ持つCVIメス  
 グリオ独自の保護膜付き金ミラーコーティングです。保護膜付  
 き金は、650 nm ~ 10 μmにおいて平均95 %の反射率を有し  
 ています。3 μmにおけるレーザー損傷テストにおいて、この  
 PGコーティングは  $18 \pm 2$  J/cm<sup>2</sup>, 260 μsのパルス (0.4  
 MW/cm<sup>2</sup>) に絶える事が分かっています。このミラーは、アル  
 コールやアセトンのような有機溶剤によりクリーニングする  
 ことができます。

### 金 (PG-BARE)



近赤外から遠赤外まで広範囲に使用が可能  
 熱線の効果的な制御に  
 $R_{avg} > 99\%$  @700 nm ~ 20 μm  
 損傷しきい値 : 1.1 J/cm<sup>2</sup>, 20 nsec パルス  
 (48 MW/cm<sup>2</sup>) @1064 nm, 標準値

金コーティングは、近赤外、中間赤外、および遠赤外領域にわ  
 たりに反射率が高く、曇りが少ない特性を有しています。  
 金コーティングは柔らかく傷が付き易いため、コートされたミ  
 ラー表面をクリーニングするには溶剤や清浄な水を流して清  
 掃するか、乾燥したエアを低圧で吹きかけることをお勧めし  
 ます。

## MAXBRite™ コーティング(MAXB)

MAXBRite™ (Multilayer All-dielectric Xerophilous Broadband Reflecting Interference) コーティングは、市販されている広帯域ミラーコーティングの中で最高のものです。MAXBRite™には、4つの広い波長領域(245 nm ~ 390 nm、420 nm ~ 700 nm、480 nm ~ 700 nm、および630 nm ~ 850 nm)用のコーティングをご用意しています。これらのコーティングは全て、それぞれの波長領域において入射レーザー光の98%以上を反射します。

このコーティングは、*s*-偏光および*p*-偏光の双方において非常に高い反射率を呈します。主要なレーザー波長に対する45°までの入射角度においても、*s*-偏光および*p*-偏光の反射率は平均で99%を超えます。ほとんどのアプリケーションにおいて、このコーティングは金属コーティングやエンハンスド金属コーティングを凌駕します。

MAXB-245-390紫外用MAXBRite コーティングは、紫外域の用途に対して優れた性能を有しています。これは、ほとんどの固体レーザーの第3および第4高調波と共に、多くのエキシマレーザーに最適なコーティングです。また、水銀ランプやキセノンランプのような広帯域の紫外線光源に対して、特に有用です。この高度なコーティング内の機械的ストレスのため、用いられる基板は 1/4(絶対標準に対して)より優れた面精度を持つものに限られます。

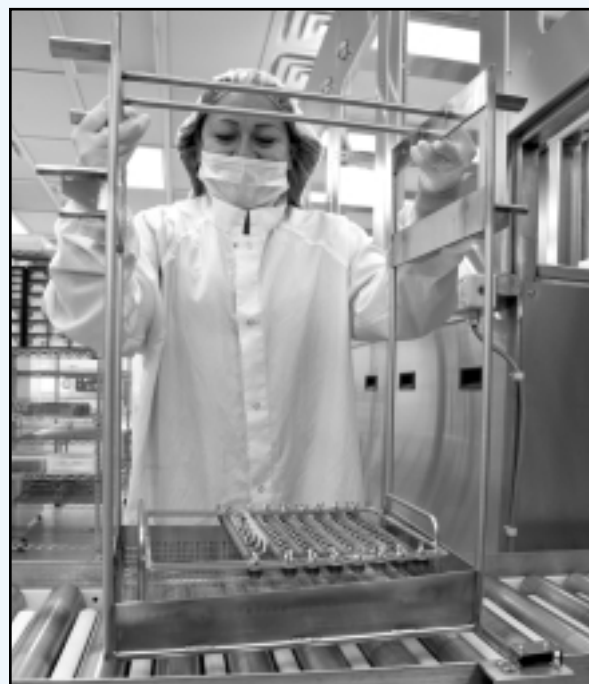
MAXB-420-700 拡張MAXBRite コーティングは、500 nm以下の特性に優れ、442 nmのHeCdレーザーやアルゴンイオンレーザーの青色発振ラインに特に有用です。この構造の複雑なコーティングの機械的ストレスのため、MAXB-245-390と同様に基板の面精度は 1/4より優れた物に限られます。

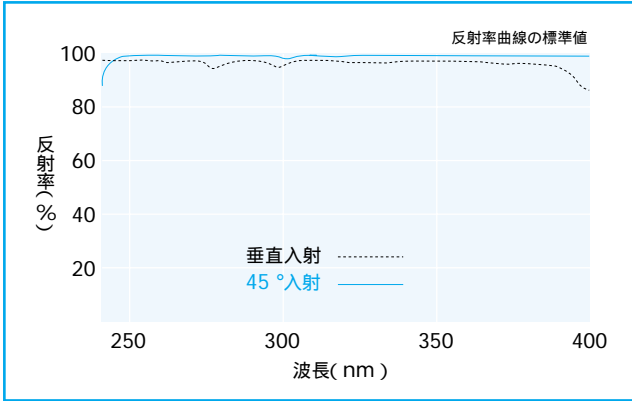
MAXB-480-700 MAXBRite コーティングは、装置への組み込みや、外部でのレーザービームの操作に最適です。これは、波長可変色素レーザーやパラメトリック発振システムへの使用に最適です。

MAXB-630-850 MAXBRite コーティングは、630 ~ 850 nmの可視および近赤外ダイオードレーザーの主要な波長全てをカバーしています。この広帯域コーティングにより、温度変化により波長がドリフトするダイオードレーザーのアプリケーションに最適です。また、MAXB-630-850によりHeNeレーザーを用いた近赤外ダイオードレーザーシステムのアライメントが可能となります。

## 光学ガラスのクリーニング

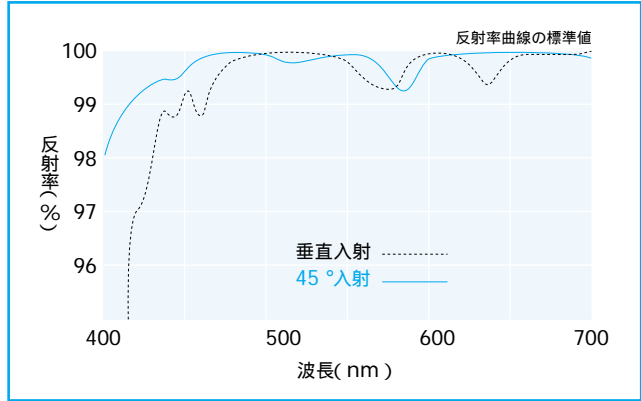
CVIメレスグリオでは、高性能ガラス洗浄機を使用し、コーティング前の基板の汚れを全て取り除いています。





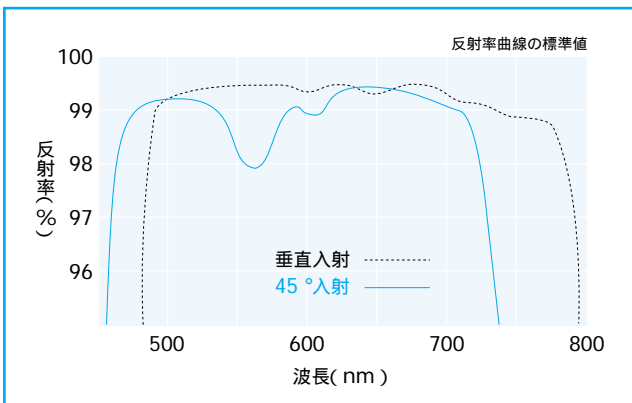
MAXB-245-390 コーティング

$R_{avg} > 98 \% @ 245 \sim 390 \text{ nm}$   
 損傷しきい値：0.92 J/cm<sup>2</sup>、10 nsec  
 (パルス@532 nm、標準値)



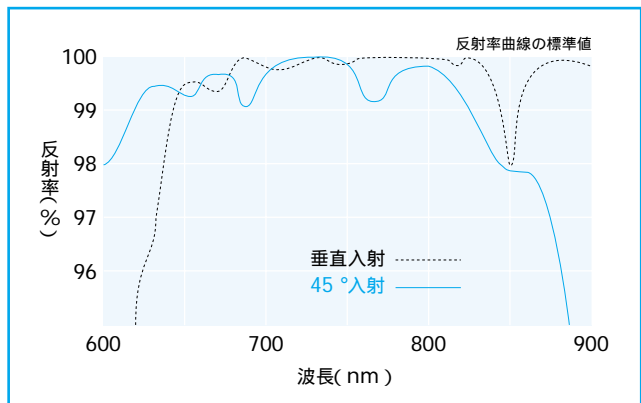
MAXB-420-700 コーティング

$R_{avg} > 98 \% @ 420 \sim 700 \text{ nm}$   
 損傷しきい値：0.4 J/cm<sup>2</sup>、10 nsec  
 (パルス@532 nm、標準値)



MAXB-480-700 コーティング

$R_{avg} > 98 \% @ 480 \sim 700 \text{ nm}$   
 損傷しきい値：0.92 J/cm<sup>2</sup>、10 nsec  
 (パルス@532 nm、標準値)



MAXB-630-850 コーティング

$R_{avg} > 98 \% @ 630 \sim 850 \text{ nm}$   
 損傷しきい値：0.92 J/cm<sup>2</sup>、10 nsec  
 (パルス@532 nm、標準値)

## レーザーラインMAX-R™ コーティング

レーザーラインMAX-R™ コーティングは、損傷しきい値がより高く改良されました。0°または45°の入射角度で同様に最適化され、高い反射率を維持すると同時に、損傷しきい値が著しく改善されました。下記の表には、これらコーティングの新たな製品コードが記載されています。これらが施されたミラーの仕様に関しては、製品番号索引から調べてください。更なる質問がある場合には、お気軽にCVIメレスグリオまでお問合せください。

特定のレーザー波長と入射角度において可能な限り高い反射率を達成

0°または45°の入射角度における一般的なレーザー波長用のコーティングを標準でご用意

193 ~ 1550 nmの範囲で特注コーティングも可能

### 製品のアップグレード

レーザーラインMAX-R™ ミラーは、広範囲なレーザー発振ラインに適合するように改良されました。本カタログのレーザーラインMAX-R™ ミラーの章には、旧メレスグリオの製品番号と新たなCVIメレスグリオの製品番号が列記されています。

レーザーラインMAX-R™ コーティング、垂直入射用

波長 (nm)	レーザーのタイプ	最小反射率 R <sub>p</sub> (%)		旧コーティング番号	製品コード
		0° 入射	0° ± 15° 入射		
193	ArF	97.0	94.0	/201	ARF
248	KrF	98.0	95.0	/202	KRF
266	Ndの第4高調波	98.0	95.0	/203	Y4
308	XeCl	99.0	96.0	/204	XECL
351	Ar イオン	99.0	96.0	/205	AR3
364	Ar イオン	99.0	96.0	/207	AR3
442	HeCd	99.3	99.0	/209	HC1
458	Ar イオン	99.5	99.3	/211	AR2
466	Ar イオン	99.5	99.3	/213	AR2
473	Ar イオン	99.5	99.3	/215	AR2
476	Ar イオン	99.5	99.3	/217	AR2
488	Ar イオン	99.5	99.3	/219	AR1
496	Ar イオン	99.5	99.3	/221	AR1
502	Ar イオン	99.5	99.3	/222	AR1
514	Ar イオン	99.5	99.3	/223	AR1
532	Ndの第2高調波	99.5	99.3	/225	Y2
543	HeNe	99.5	99.3	/226	CV
633	HeNe	99.5	99.3	/229	HN
670	GaAlAs	99.5	99.3	/228	LDM
780	GaAlAs	99.3	99.0	/233	LDM
830	GaAlAs	99.3	99.0	/237	LDM
1064	Nd	99.2	99.0	/241	Y1
1300	InGaAsP	99.2	99.0	/245	LDM
1523、1550	HeNe、InGaAsP	99.2	99.0	/247	LDM

旧メレスグリオ製品番号は、新たなCVIメレスグリオ製品番号に置き換わります。

レーザーラインMAX-R™ コーティング、45°入射用

波長 (nm)	レーザーのタイプ	最小反射率 R <sub>p</sub> (%)		旧コーティング番号	製品コード
		45° 入射	45° ± 15° 入射		
193	ArF	97.0	94.0	/251	ARF
248	KrF	98.0	95.0	/252	KRF
266	Ndの第4高調波	98.0	95.0	/253	Y4
308	XeCl	98.0	95.0	/254	XECL
351	Ar イオン	98.0	96.0	/255	AR3
364	Ar イオン	98.0	96.0	/257	AR3
442	HeCd	99.0	98.0	/259	HC1
458	Ar イオン	99.3	98.0	/261	AR2
466	Ar イオン	99.3	98.5	/263	AR2
473	Ar イオン	99.3	98.5	/265	AR2
476	Ar イオン	99.3	98.5	/267	AR2
488	Ar イオン	99.3	98.5	/269	AR1
496	Ar イオン	99.5	98.5	/271	AR1
502	Ar イオン	99.5	98.5	/272	AR1
514	Ar イオン	99.5	98.5	/273	AR1
532	Ndの第2高調波	99.5	98.5	/275	Y2
543	HeNe	99.5	98.5	/276	CV
633	HeNe	99.5	98.5	/279	HN
670	GaAlAs	99.0	98.5	/278	LDM
780	GaAlAs	99.0	98.5	/283	LDM
830	GaAlAs	99.0	98.5	/287	LDM
1064	Nd	99.0	98.0	/291	Y1
1300	InGaAsP	99.0	98.5	/295	LDM
1523、1550	HeNe、InGaAsP	99.0	98.5	/297	LDM

旧メレスグリオ製品番号は、新たなCVIメレスグリオ製品番号に置き換わります。



### 超高速コーティング (TLMB)

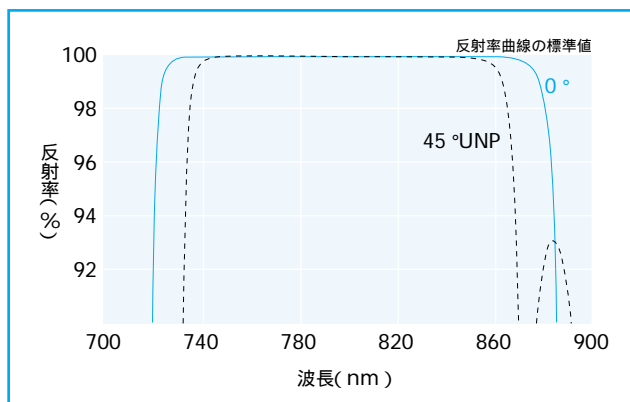
CVIメレスグリオは、近赤外波長領域で動作する長短パルスレーザーシステム用に新たなコーティングを開発しました。この800 nmを中心波長とする総誘電体コーティングは、超短パルスにおけるパルスの拡張が最少となっています。また、750 nm ~ 870 nmの波長領域において *p*-偏光および *s*-偏光の非常に高い反射率を呈します。

この超高速コーティングは、ハイパワーのTi:サファイアレーザー用ミラーに最適です。これは、保護膜付き金属ミラーやエンハンスド金属ミラーコーティングよりも高いパワーに耐えることができる優れたコーティングです。

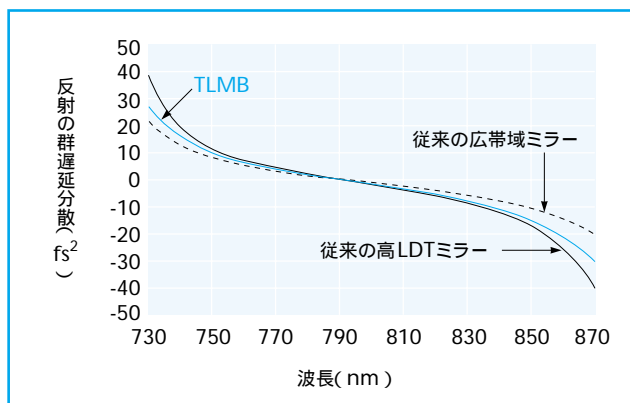
### 超高速コーティング (TLMB)

波長 (nm)	最小反射率 R <sub>p</sub> (%)	入射角度 (°)	パルス幅の拡大率 (%)	旧コーティング番号	製品コード
770 ~ 830	99.0	45	< 18.0	/091	TLMB

旧メレスグリオ製品番号は、新たなCVIメレスグリオ製品番号に置き換わります。



TLMB 超高速コーティング



従来 of 広帯域ミラー、従来の高レーザー損傷しきい値 (LDT) ミラー、およびCVIメレスグリオのTLMB 超短パルス用ミラーにおける波長に対する反射の群遅延分散の比較

## レーザーによる損傷

CVIメレスグリオでは、CVIメレスグリオ製光学部品のレーザーによる損傷試験を行なっています。しかしながら、本章に記載される損傷しきい値は、保証値ではなく、コーティングの損傷を防ぐための参考値です。損傷しきい値の仕様において、その設計波長でのコーティングのテストに適したハイパワーレーザーが用意できないため、しばしば参照用として他のコーティングを用います。参照用コーティングの損傷しきい値は、当該コーティングでの値に精確に換算されます。

損傷しきい値の仕様として、ピークフリューエンス(平方センチあたりのエネルギー)、パルス幅、ピーク放射強度(平方センチあたりのパワー)、およびテスト波長の情報が列記されます。ピークフリューエンスは1パルスあたりのトータルエネルギー、パルス幅は半値全幅(FWHM)、そしてテスト波長は損傷を与えるテストに使用したレーザーの波長を示します。ピーク放射強度は、個々のパルスエネルギーを実質的なパルス長さ(パルスの半値幅より12.5%から25%長い)で割ったものです。全てのテストは、20 Hzの繰り返し周波数で10秒間継続して行ないます。同じ繰り返し周波数であっても、持続時間が長ければ低いエネルギーであっても損傷が起こるため、これは重要なパラメータです。

コーティングの耐久性は、基板の材質、波長、およびパルス幅に依存します。また、不適切な取り扱いやクリーニングの方法と共に、光学部品を取り扱う環境もコーティングの損傷耐性を低下させる原因となります。これらの損傷しきい値は、保証値ではなく、参考値と見なしてください。

パワーに対する耐久性からコーティングを選択する場合、下記のようなポイントに従って簡単に決定することができます。初めに、基盤材質の選択は非常に重要です。BK7ではなくフューズシリカを使用することにより、高い損傷しきい値を得ることができます。次に、コーティングについて検討します。金属コーティングの損傷しきい値は、非常に低くなっています。HEBBAR™やMAXBRiTe™ コーティングのような広帯域誘電体コーティングは優れていますが、V-コーティングやMAX-R™ のような単一波長用もしくはレーザーラインコーティングは、より優れています。より高いしきい値が必要な場合には、高エネルギーレーザー(HEL)用コーティングが必要となります。アプリケーションにおいて損傷レベルに関する疑問や質問がありましたら、CVIメレスグリオまでお気軽にお問合せください。

## OEMおよび特注コーティング

CVIメレスグリオは、高度なコーティング能力を維持管理しています。ここ数年の間に、CVIメレスグリオは最新のコーティング技術を活用できるようにこれらのコーティング設備の拡張と改善を行なってきました。その結果、OEMに関しては大量のコーティングを他社にひけをとらない価格で提供することができ、最も過酷な要求を持つお客様には特別で高性能なコーティングを提供することができます。CVIメレスグリオでは、コーティングの設計と製造において高い能力を持つ熟練スタッフを擁しています。このグループは、長年にわたる経験と最新の学術研究知識を併せ持っています。設計と製造に関する重要な点を徹底的に理解しているCVIメレスグリオは、他社にひけをとらない価格で高品質なコーティングを繰り返し製造する能力に優れています。

### 大量生産

CVIメレスグリオのコーティング拠点の製造能力により、大量の特注製品を他社よりも低価格で提供することができます。少量を必要とするお客様にとっても、この大量生産から利益を得ることができます。少量の特別な基板は、需要の多いカタログコーティングの工程に割り込ませる事により費用効果の高いコーティングを施すことができます。

### 特注設計

お客様の仕様に合わせた特別なコーティング設計と製造は、CVIメレスグリオのコーティング施設の重要な仕事の1つです。これらの設計は、赤外から深紫外までの広範囲な波長において、基礎研究から産業分野や医療用の製品の設計製造に至るまでをカバーしています。最も一般的な特注コーティングは、カタログコーティングの設計波長をシフトするというものです。

### 技術サポート

CVIメレスグリオのベテラン技術者は、お客様のシステムの要求に関して検討を行います。システムの設計に対するシンプルな修正により、特別な設計に替えてカタログ製品やコーティングに置き換え、しばしばコストを削減することができます。