U.D.C. 539.234

均一蒸着膜と干渉フィルタへの応用

Uniform Thickness Evaporated Film and Its Application for Interference Filters

> 勝* 岩 崎 Toshikatsu Iwasaki

概 梗 内 容

真空蒸発法によって試料全面にわたって高精度で均一な膜厚に蒸着する方法について実験し、干渉フィルタ に応用した。

従来均一蒸着法としては一般に蒸発源と蒸着面の距離をできる限り離す方法が用いられていたが、本報告で は蒸発源を点、線、平行二重線、円形などに配置した場合の膜厚偏差および利用率について実験し、最良の方 法を求めて干渉フィルタの製法に応用した。また大形のものの均一蒸着法について実験し、試料回転法によっ て直径 200 mm の均一な大形干渉フィルタを試作した。さらに実用上一回の蒸着操作で均一な干渉フィルタが 多数作れる量産装置を作り,各フィルタ特性の均一性をしらべた。

_____ 37 _____

言 1. 緒

真空蒸発法の発達によって, 金属や非金属の膜を蒸着させてこれ を利用する研究が盛んとなり,各方面に応用されるようになってき た。この真空蒸発法によって蒸着された膜厚は, 真空度, 蒸発源の



形状,配置法,蒸発物質,蒸発量および蒸発源からの距離などによ って変化するので、試料全面にわたり一様な膜厚につけることは困 難である。実用上膜厚を均一につけることは重要な問題で、たとえ ば干渉フィルタを真空蒸発法によって作る場合、わずかでも膜厚が 不均一になれば中心波長のずれを生じ色むらが現われるので、膜厚 を高精度で均一に蒸着する必要が生じてくる(1)。

従来均一な蒸着膜を得るのに,一般に蒸発源と蒸着面との距離を できるだけ離す方法が用いられていた。この方法は蒸発物質の利用 率が非常に悪く,貴金属を用いる場合は原価を高め,また一方大形真 空容器を必要とし排気時間も長くかかるので経費がかさむなどの欠 点がある。この欠点を除き,限られた真空容器内でできる限り大き な面積に均一に蒸着させるため,最初に蒸発源の配置法について実 験し,点,線,平行二重線および円形の各蒸発源の配置法について 膜厚偏差および利用率を比較し,最良の方法を求めて干渉フィルタ の製法に応用した。また大形のものについて均一蒸着法を実験し, 試料回転法によって直径 200 mm 程度の均一で大形の干渉フィルタ を試作した。さらに実用上は一回の蒸着操作で均一なフィルタを多 数同時に作る必要があるので,この均一蒸着法の量産方式について 実験し,量産装置を作り,各フィルタ特性の均一性をしらべた。

2. 蒸発源の配置法による均一蒸着法

均一蒸着法は基本法則の類似から,照度分布や静電界の電場分布 などと関連類似があり、この方面の研究からも推察できる。 J. Strong氏は天体反射望遠鏡に Alの反射面を蒸着させるのに, 膜の均一 性と蒸発源の配置法について考察し, 円形蒸発源を用いてかなり均 一な蒸着膜を得た(2)。これが本研究の端緒である。

点蒸発源から蒸発する分子は真空中では各方向にわたって一様に 飛散するから, 試料面に蒸着する物質量すなわち膜厚は距離の二乗 に逆比例し, 蒸発源に対して張る立体角に比例することが見出され ている。蒸発源が点でない場合も各要素が同じ法則に従うものとみ なしてさしつかえない。蒸発源としては点,線状のものを用い,こ れらを適当に組み合わせて平行二重線,円,正方形のものについて 実験した。 日立製作所多賀工場

*

0 20 15 25 10 5 許容偏差(%) 第3図 各蒸発源の利用率 2.1 点 蒸 発 源 第1図に示すように点蒸発源Sよりの蒸発量をµとし、高さhの



評 論

Ħ

立

 $\tan^{-1}\left(\frac{x}{h}\right)$ となる。前回同様 h = 300 mm とし、中心との膜厚偏差および一定 許容偏差に対する利用率を計算した結果をそれぞれ 第2図B, 第3 図Bに示す。この結果から点蒸発源よりは線蒸発源のほうが偏差利 用率ともにすぐれており,同じ偏差に対しては数倍の利用率が得ら れる。実際の場合は線の長さが有限であるから端効果の影響で偏差 はこれよりも多くなる。線の全長が垂直距離の20倍以上ならば補正 の必要もないが、真空容器の関係よりそんなに長くすることはでき ない。線蒸発源として長さ 15 cm の V 溝形の Mo ボートを使用 して実験したが, 充てんする蒸発物質の量を全長にわたって一様と せず,中央部を少なくし,端部を多くして端効果を補正し,全面に 一様に蒸着するようにした。銀を用いて実験した結果, 膜厚偏差は 第4図Bに示すようになった。無限長線蒸発源として計算した結果 より偏差は幾分多くなった。これは端効果の補正が十分でなかった 点と, 蒸発源が線でなく幅をもっておりまた場所により蒸発量が相 違したためと思われる。

2.3 平行二重線蒸発源

平行二重線蒸発源の場合も前回同様無限長の場合について計算す ると、第5図に示すように二蒸発源間の距離を2a,高さをhとする ٤,

試料平面上の中心点Oよりxの距離にある点Xに蒸着する金属の面 積密度 σは,

となる⁽³⁾。厚さは σ に比例するから、中心点 O と X 点との膜厚の比 をこの式より計算できる。

高さ h=300 mm として、中心との膜厚の比を計算した結果を第 2図Aに示す。この場合中心より 30mm 離れた点で1%の膜厚偏 差を生じる。

一方利用率は中心より x までの面積が利用できるとして, この中 に蒸着した量と全蒸発量との比で表わすことにし、これをりとする ٤,

となり,距離が大になるほど利用率は著しく悪くなる。

一定の膜厚許容偏差に対する利用率を上式より計算した結果を第 3図Aに示す。

以上の計算結果より点蒸発源を用いて膜厚を均一に蒸着するに は,利用率・真空蒸発装置などの点から考えて実用的でない。 アル ミナのるつぼを用いて銀を蒸着したとき,蒸発源より300mmの距 離にある試料面上の中心点とX点との膜厚偏差を測定した結果を第 4図Aに示す。完全な点蒸発源は実用上得がたく、るつぼを使用す る場合はある程度の面積をもつ上に方向性も入ってくるので計算結 果より偏差は多くなった。

2.2 線 蒸 発 源



ただし η は -a < x < a の範囲内の利用率である。 σ は $0 < a/h \leq$ $1/\sqrt{3}$ ならば中心点 0に極大値をもつ単峯形となり、 $a/h>1/\sqrt{3}$ ならば0に極小値をもつ双峯形となるが、a/h=1/√3 すなわち ∠S₁OS₂=60度のときに最も平らな分布曲線となることが知られ ている。それゆえ $a=h/\sqrt{3}$ の配置をとり、h=300mm として膜 厚偏差を計算した結果は第2図Cに示すとおりである。点および線 蒸発源に比べて偏差が著しく少なくなり、半径約100mmまで1% 以内の偏差で蒸着できることがわかる。また利用率は第3図Cに示 すとおりで,前者に比べて向上している。上述の配置法で単線の場 合と同様に銀を用いて端効果を補正し蒸着したところ,第4図Cに 示すような偏差の測定結果が得られた。この場合は前回のほかに二 つの蒸発源を使用するので,両蒸発源の蒸発量が完全に等しくなら ないために誤差が入ってくる。この場合の実験結果では、 偏差1% 以内では直径 60 mm まで, 5%では 150 mm まで利用できる。

2.4 円形蒸発源

閉曲線の一例として円形蒸発源の場合には,第6図に示すように, 半径を a とすると,

$$\sigma = \frac{\mu}{2\pi h} \cdot \frac{2 a h^2}{\sqrt{(a+x)^2 + h^2} \{(a-x)^2 + h^2\}} E\left(\frac{\pi}{2}, K\right)$$

ただし E は楕円関数

この場合 a/h=1 すなわち円の半径と垂直距離が等しい場合は分布 曲線が平らになるので、a=h=150mmとして計算した結果を第2図 Dに示す。実際にタングステン・ヘリカルコイルを用いて Alを蒸着 した場合の膜厚偏差の測定結果は第4図Dに示すようになる。各エ レメント蒸発源の蒸発量が等しくならないために偏差も多くなる。 試料が正方形の場合には,蒸発源を正方形に配置して蒸着すれば よい。この場合は円形よりは多少偏差が多くなる。 以上の結果より, 蒸発源としては, 点より線へ, 単線より平行二

線蒸発源の場合は,まず計算の都合上無限長の場合について考え, 有限長の場合には端部の影響による補正を行えばよい。無限長の場 合は横方向の分布のみを考えればよいから,単位長当りの蒸発量を μとすると,





m: 干 渉 次 数 第7図 干渉フィルタ中間層の膜厚と中心波長の関係

第1表 干渉フィルタの膜厚偏差と中心波長の移動量 (A) m=1の場合

干渉フィルタの中心波長: $\lambda_{\max}(m\mu)$	400	500	550	600	700
膜厚偏差1%の時の λ_{\max} の移動量 $(m\mu)$	1.0	3.0	4.3	5.2	5.7
λ_{\max} の移動量を $1m\mu$ とした時の膜厚許容偏差(%)	1.0	0.33	0.23	0.19	0.18
(B) m≥1, λ _{max} =550 mµの場合					
干渉次数:m		1	2	3	4
時回信美1%の時の2 の移動量(mm)		4.3	4.5	5.0	4.8

た。これより膜厚に1%の偏差があったときの中心波長のずれを計 算した結果が第1表である。同じ膜厚偏差でも長波長用のフィルタ ほど波長ずれが多くなってくるので、膜厚の許容偏差も厳格におさ えなければならない。中心波長の移動量を1mµ以内にするには第 1表に示すように 700 mµのフィルタで膜厚許容偏差を 0.18%以内 にする必要がある。これは非常に厳格な偏差になってくる。実用上 主波長のずれを2mµ までとみても許容偏差が 0.36%となる。

高次干渉フィルタの場合も膜厚許容偏差は第1表に示すように一 次干渉の場合とほぼ同じである。前述のように蒸発源の配置法をく ふうして、単線または平行二重線蒸発源を用いても、直径 30 mm のものが限度と考えられる。ゆえに大形の干渉フィルタあるいは同 時に多数のフィルタが製作できる量産装置を作るには特殊の方式を 採用しなければならない。

3.2 線蒸発源を用いた干渉フィルタの均一蒸着法

線蒸発源を用いて直径 30 mm の干渉フィルタを作りその特性の 偏差を測定した。蒸発源としては Ag, Mg F₂ とも長さ 150 mm の Mo ボートを用い,フィルタ生地までの距離を 300 mm にとった。 分光光電光度計で第8 図に示すような各位置で分光透過率を測定 し,第9 図に示すような結果を得た。測定光束の大きさは8×16 mm で (-3) の 3 箇所で測定し,さらにフィルタを90度回転させ(-6)の 3 箇所で測定した。この 6 箇所の各位置で測定した分光透過率は 非常によく一致し,ほとんど区別することが困難なほどであり,中

重線へと配置することにより同一真空容器内で大きな面積にわたっ て偏差の少ない蒸着膜が得られる。また円形蒸発源は蒸着面の大き い場合には効果的である。これらのうち平行二重線蒸発源はその配 置も簡単で,しかも偏差の少ない方法であるから限られた真空容器 内で最大限の均一蒸着面をうることができる。

3. 干渉フィルタの均一蒸着法

干渉フィルタを製作する場合に必要な膜厚の許容偏差を計算によ って求めた。そして上述の線蒸発源を用いて干渉フィルタを作った 場合の膜厚偏差,色むら,中心波長ずれなどを測定した。

3.1 膜厚偏差と干渉フィルタ中心波長の移動量

干渉フィルタの中間層の膜厚によって中心波長位置がきまり、この膜厚がわずかに変化しても中心波長は数mµずれるので、膜厚に 偏差があれば全面積一様なフィルタとはならず色むらを生じることになる⁽¹⁾。この中間層の膜厚と中心波長の関係を計算した結果を **第7**図に示す。mは干渉次数で一次より五次干渉のものまで計算し 心波長も±1mµ以内に収っており,色むらも認められないので均 一な満足すべきフィルタということができる。平行二重線蒸発源を 用いても同様な結果が得られた。この方法で直径 50 mm の同波長 のフィルタを作ったときは中心波長が±3mµ 程度ずれを生じた。

4. 大形均一蒸着法

干渉フィルタは上述のように高度の膜厚均一性を必要とするの で,蒸発源の配置法を種々くふうしても,中心波長のずれを ±1mp 以内におさえれば,高々直径 30 mm 程度のフィルタしかできな い。これより大形の干渉フィルタを作る場合,大形の真空蒸発装置 を用いることは前述のように得策ではないので,蒸着面を回転させ てつける方法につき実験した。

4.1 原 理

この方法は R. A. Fisher, J. R. Platt 氏の行った方法⁽⁴⁾ と同原理 で、第10回において蒸着面を k, l, m, n とし、法線 OO' を軸とし て一様に回転させる。点蒸発源をSの位置におき、SO'//KO、OS =a OO'=b SP=r とし、図示するように $\angle \alpha, \angle \theta, \angle \phi$ をきめ蒸 着面上の一点 P の面積密度を計算した。蒸着面が OO' 軸の周りを 一定角速度 ω で N 回転する間に蒸着される物質の面積密度を D (y, α)で表わすと、





336

昭和35年3月

論











$$D(y, \alpha) = \frac{GE\left\{2\left(\frac{y \sin \alpha}{1+y^2+2y \sin \alpha}\right)^{\frac{1}{2}}\right\}}{(1+y^2+2y \sin \alpha)^{\frac{1}{2}}(1+y^2-2y \sin \alpha)}$$
.....(10)

をうる。ただしGは常数である。

楕円積分の数値表を用いてこの $D(y \cdot \alpha)$ を計算し,蒸発源と蒸着面の中心法線とのなす角 α をパラメータにとって,中心と中心から ρ/a だけ離れた点との膜厚の比 D/D_0 を計算した結果が第11 図である。この結果より $\alpha=0^\circ$ の場合は点蒸発源の場合と同一であるが,



4.2 実験装置とその結果

— 40 —

40

第12図に示すように直径 400 mm のベルジャを用い, 試料蒸着 面は中心軸の周りを外部より回転できるようにし, 蒸発源は中心よ り40度の方向に置き, アルミナのるつぼを用いて銀を蒸着した。回 転速度は種々実験した結果 100 rpm 程度がよかった。試料としては 直径 220 mm のガラス板を用い, 最初に銀を蒸着してみた。蒸発源 としてアルミナるつぼを用いると円錐形のため方向性をもち, 結果 がよくなかったので, Mo ボートを使用して実験した。

銀の透過率を測定して膜厚偏差を求めた結果を 第13 図 に示す。 この二つの例より中心点と 100 mm 離れた点との膜厚偏差はほぼ 1 %以内に入っている。

この方法によって直径 220 mm の干渉フィルタを作り、その分光 透過率を4箇所で測定した結果、第14図に示すような結果を得 た。中心波長のずれは中心より50 mm 離れた点で約1 mµ、75 mm のところで約3 mµ、100 mm のところで5 mµ以内に入っている。 中心波長のずれが5 mµ では色むらも生じるが、3 mµ以内なら大し て目立たないので実用上は差しつかえない。このような回転式均一 蒸着法によって直径約200 mm の大形干渉フィルタも中心波長ずれ を5 mµ以内に収めることができた。

 $\alpha = 40 \sim 41^{\circ}$ のとき偏差が最も少なくなっている。 $\rho/a = 0.25$ までほ とんど偏差がないことになる。また偏差 1%なら $\rho/a = 0.4$ まで利用 できることになる。これはたとえば OO' = 200 mm, $\alpha = 40^{\circ}$ とする と, 偏差 1%以内の ρ の値は100 mmとなり, 直径 200 mm の全面積に わたって均一な蒸着膜が得られることになる。点蒸発源の場合と比 較すると, $\alpha = 0^{\circ}$ のときは $\rho = 15$ mmであるから, 均一蒸着面積を著 しく拡大することができ, 大形の干渉フィルタも製作可能になる。

5. 量産式均一蒸着法

実用上要求される干渉フィルタの大きさは,通常直径 30 mm 程度



際には線蒸発源を用いたので膜厚の不均一を生じた。第16図 Aは この方法で同時に蒸着した6枚のフィルタについて分光透過率を測 定した結果である。中心波長のばらつきは最大 26 mµ も生じた。 また各フィルタごとの色むらも相当顕著に現われたので,第8図に 示した各位置で同様な方法で色むらを測定した。第17図Aはその 結果で,両端部で中心波長32mµのずれを生じた。結局この方法で は6枚のフィルタの特性がばらつき、また各フィルタも場所によっ て特性の相違を生じ、色むらが著しいので実用にはならない。蒸発 源が理想的な点蒸発源ならば,この方法でも均一蒸着膜が得られる ものと思われる。

5.2 回 転 法

膜厚の不均一は回転することによってある程度除くことができる ので、前回と同じ配置法でその中心軸の周りに回転しながら蒸着し てみた。回転装置は第12図と同様に外部よりモートルで駆動し、 試料を100 rpm で回転した。

第16図 B はこの方法で作った6枚のフィルタの分光透過率を測 定し、その特性のばらつきを調べたものである。回転方式の採用に よってばらつきが著しく減少した。しかし色むらが残っているので 前回同様一枚のフィルタの3箇所で分光透過率を測定した結果,第 17図 B に示すように中心波長に ±4mµ のずれを生じた。前回の 結果と比較して, ばらつき, 色むらともに著しく減少したが実用に はなお不十分である。



第15図 球 面 配 置 法

で十分であるから、1回の蒸着操作で均一なフィルタを多数同時に できる量産装置を試作し、各フィルタ特性の均一性をしらべた。

5.1 球面配置法

蒸発源を中心とする球面上にフィルタ生地を配置し蒸着する方法 を行った。第15図は6枚配置したもので、蒸発源からの距離が等 しいから一様な同じ特性のフィルタができるはずである。しかし実

5.3 公転·自転回転法

前2回の実験結果にもとづいて蒸着装置をさらに改良し、やとい の回転だけでなくフィルタ生地をも同時に回転できるようにし、公 転と自転が同時に行える第18図に示すような蒸着装置を作った。 中心軸を 40 rpm で回転させ、これに歯車をとりつけ各フィルタ生地 取付わく上部の歯車とかみ合わせて生地が120rpmになるようにし た。このような公転自転回転装置を用いて同時に作った6枚のフィ ルタの分光透過率を測定した結果は第16図 Cに示すように特性が 非常によく一致し、ばらつきが認められなかった。また色むらを測 定した結果が第17図Cで、6箇所の分光透過率の測定値がよく一 致し, 中心波長のずれは認められなかった。またこのような方法で 作った各波長のフィルタについて、ばらつきおよび色むらを測定し た結果をそれぞれ第2,3表に示す。いずれも特性が非常によく一致 し、実用上なんら支障がない程度のものが得られた。

このような公転自転回転装置を使用することによって,同時に均



論

第 42 巻 第 3 号







第2表 干渉フィルタ中心波長のばらつきの測定結果

フィルタの種類	No.54	No.54	No.55	No.55	No.56	No.56	No.61	No.61
※有ノイルター	540	500	1					
1	542	538	552	556	565	568	615	608
2	541	540	552	558	565	568	614	608
3	540	540	550	556	566	568	615	608
4	540	538	550	556	567	570	614	608
5	542	538	550	555	566	568	615	608
6	540	540	552	556	565	568	614	608
中心波長平均(mµ)	540.8	539.0	551.0	556.2	565.7	568.3	614.5	608.0
最大偏差(mμ)	1.2	±1.0	±1.0	1.8	1.3	1.7	±0.5	0

A: 正 面 全 貌
第 18 図 公転自転回転法の蒸着装置

ーな特性のフィルタが6枚製作できるようになり,フィルタ量産能 率が著しく向上し,製作原価を低減することができた。さらに直径 400 mm のベルジャーを用いて同時に8枚生産できる量産装置を作 り,特性をしらべた結果よく一致したものが得られた。実用上フィ ルタの直径は13 mm 程度のもので十分であり,この大きさならば第 18 図 に示すように一つのわくに3枚ずつ入るから,18~24枚のフィ ルタを同時に作ることができ,それらの特性もすべてよく一致した ものが得られた。これらの量産機は現在干渉フィルタの生産に大い に役立っている。

6. 結 言

真空蒸発法によって試料全面にわたって高精度で均一な膜厚に蒸 着する方法について実験し,干渉フィルタに応用した。

最初に蒸発源を点・線・平行二重線・円形などと配置した場合の 膜厚偏差および利用率を計算し,実験によって最良の方法を求めた 結果,平行二重線蒸発源はその配置も簡単で偏差も少なく,利用率 もよくて限られた真空容器内で最大の均一蒸着面をうることができ

た。

第3表	干渉フィ	ルタ	測定位置の相違による中心
波長ず	れの測定	ミ結果	(色むらの測定結果)

フィルタの種類 測定位置*	No.54	No.55	No.56	No.61
1	542	552	565	614
(2)	542	552	565	615
(3)	542	553	566	615
4	542	553	566	616
5	543	551	566	615
6	543	552	566	615
中心波長平均 (mµ)	542.3	552.2	565.5	615.0
最大偏差(mµ)	0.7	-1.2	± 0.5	±1.0

* 測定位置 No. は第8図に示すものである。

さらに直径 200 mm 程度の大形の均一な干渉フィルタを作るため, 試料回転法について実験し, 中心波長のずれが 5 mµ 以内のフィルタを作ることができた。

実用上は 30 mm ないし 13 mm 程度の大きさの干渉フィルタで十 分であるから,一回の蒸着装作で,均一なものが 8 ないし24枚同時に できる量産装置を作り,各フィルタの特性のばらつきおよび色むら を測定した結果,非常によく一致したものが得られ,フィルタの量 産に役立てることができた。

以上の均一蒸着法は干渉フィルタの製作のみならず, 膜厚の均一 性を必要とするものの製作に広く応用することができる。

終りに臨み本実験に際し種々ご指導ご協力いただいた日立製作所

この蒸発源の配置法による均一蒸着法を干渉フィルタ製法に応用 し, 直径 30 mm の特性の均一なフィルタが得られた。干渉フィルタ を作る場合に必要な膜厚許容偏差を計算した結果,中心波長の移動 量を1 mµ 以内にするのに 700 mµのフィルタで 0.18 %以内におさ える必要があるので,上述の方法では直径 30 mm のものが限度であ った。 多賀工場関係者各位に厚くお礼申しあげる。

参考文献 (1) 岩崎:日立評論 42,221 (1960) (2) J. Strong: J. Opt. Soc. Am. 26,73 (1936) (3) L. Holland: "Vacuum Deposition of Thin Films" (4) R. A. Fisher, J. R. Platt: Rev. Sci. Inst. 8, 505 (1937)

---- 42 -----