 研 究

金属プレートを用いた蒸着の輻射熱

小 坂 雅 夫*

Radiant Heat During Vacuum Evaporation in a Metallic Plate System

Masao KOSAKA*

In vacuum deposition, the temperature rise of the coating substrates, due to the radiation energy from the evaporation source, is an important problem in case the deposition of metals is made on the materials poor in thermal resitivity. The temperature rise is influenced by the deposition rate, configuration of the evaporation source, and innner surface states of the bell jar. A shelter placed between the evaporation souce and substrates can prevent the temperature rise of the substrates to some extent. A metal plate placed very close to the evaporation source, on the other hand, can minimize the temperature rise due to the radiation energy to a greater extent; the evaporation characteristics is also improved. Optimum conditions for reducing the temperature rise, determined experimentally, are described, and the reason for the reduction in radiation heat is discussed in terms of geometrical view factor.

1. 緒 言

真空蒸着において基板材料の温度上昇は、蒸着物質の蒸気分子がもっている運動エネルギー、凝縮して膜が形成する際の内部エネルギーと、高温度の蒸発源から発する輻射エネルギーによるものである。輻射エネルギーによる温度上昇は、蒸着速度等の条件によって異なり^{1),2)} また蒸着源の形状や蒸着方法、ベルジャーの大きさ、表面状態によって大きく左右される³⁾。したがって熱に弱い基板材料の蒸着によってコーティングを行なう場合には注意を要する。

輻射エネルギーによる基板の温度上昇と蒸着源方式との関係において、蒸着源フィラメントに鉄製の板を極めて接近させて蒸着すると、基板材料の受ける輻射熱が著しく低減され、その上蒸発源からの輻射熱の指向特性、蒸着源距離、加熱エネルギー、ベルジャー内壁状態等による輻射熱特性を改善できる³⁾。

そこで、この金属プレートを使用した蒸着方式の輻射熱低減の理由およびこの方式の最適条件などについて実験し考察したので報告する。

2. 実験装置および方法

図1は金属プレートを用いた蒸着方法の略図である。これは蒸着源①と基板材料③の軸上に、中央に穴のあけた金属プレート②を蒸着源フィラメントに接近させて置く方式である。これに類似した方法として蒸着源と基板材料の間にピンホールや^{4),5)} スリット、ノズル⁶⁾等を置く方法が、電子顕微鏡の試料作成における蒸着に使用することがあるが、これはシャドーイング⁷⁾や特定の蒸着物質分子の通過を制限する⁸⁾ためのもので、輻射熱を防止することを主目的としたものではない。また輻射熱の遮蔽として同様な遮蔽板を蒸着源と基板材料の間に置いて実験した例^{9),10)}があるが、これは単なる熱遮蔽であって、輻射熱の低減と蒸着特性の改善を目的としたこの方式とは根本的に異なっている。

使用した真空蒸着装置は日本電子製 JEE-4B 型でベルジャーはガラス製で内直径 25cm、高さ 26cm、容積 10l のものである。蒸着源はベルジャーの中央に 0.8mmφ のタングステン線を直径 5mm のコニカルバスケット状に巻き、これに加熱電力 70W の一定エネルギーを加え、その下方 70mm の位置に蒸着基板の代りに、直径 6mm、厚さ 0.26mm の鉄板にサーミスター温度素子を取り付けたものを置き、蒸着源フィラメントに通電加熱開始後 3 分間の温度上昇を測定して遮蔽板、金属板等を使用しない

* 工学院大学 (〒160 新宿区西新宿1-24-2)
Kohgakuin Univ.

1-24-2, Nishi-shinjuku, Shinjuku-ku, Tokyo 160

場合の温度上昇と比較を行なった。この実験は輻射熱の測定であるので、蒸着源フィラメントの中には蒸着物質は挿入されていない。輻射熱は蒸着中の真空度にはほとんど影響されない¹¹⁾が、実験中のベルジャー内真空度は 2×10^{-5} Torr 一定とした。図1の使用した金属プレートは、アルミニウム、鉄、銅の 50×50 mm、厚さ1, 3, 5 mmの板の中央に直径10 mm ϕ 、4 mm ϕ の穴をあけたものを用意し、断熱遮蔽効果を実験するため同寸法のマイカ製のものも用意した。

3. 実験結果および考察

図2は蒸着源の下方20 mmの位置($L = 20$ mm)に厚さ1 mm、穴径4 mm ϕ の各種金属プレートを置いた場合の輻射熱による基板の温度上昇 ΔT を測定したものである。金属プレートによる遮蔽を行なうと、遮蔽を行わない場合に比べ輻射熱による温度上昇を約60%にすることができ、遮蔽板を置いただけでもこの程度の低減は期待することができる。金属遮蔽プレートの種類による熱低減効果に差はほとんど生じないが、同寸法、同穴径のマイカ板を用いた場合の温度上昇は約80%の低減しか得

Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus.

Fig. 2 Change in temperature during the deposition on various plates.

られず、金属とははっきりした差が認められる。マイカと金属との差が生ずる理由は金属プレートが輻射線を反射するのみでなく、吸収も行なっているためであろうと思われる。さらに、金属板の種類を一定とし穴径の大きさによる熱遮蔽効果を測定すると、図3に示すごとく温度上昇の低減が穴の面積に比例せず、穴の面積を $1/100$ にしても熱遮蔽効果は $90/100$ にしかならない。これはフィラメントから穴を通して直接基板材料に進入する輻射線は少なくなるが、ベルジャーその他によって反射されたものが、温度計に入り込む¹²⁾ためと思われる。次に上と同じ穴径、厚さのマイカ、金属プレートを蒸着源の下方1 mmの位置($L = 1$ mm)に接近させて測定すると図4のような結果となる。即ち、金属プレートの場合には先の60%の減少が遮蔽板など使用しない場合に比べ50%以下に減少し、金属プレートの種類による差も生じている。マイカの場合には約76%となり、これもわずかであるが減少している。このようにプレートの穴径が同じで蒸着源に

Fig. 3 Relation between rise in temperature and hole dimension.

Fig. 4 Change in temperature during the deposition on various plates.

近づけた場合、蒸着源からの熱輻射面積が広がるにもかかわらず、輻射熱による基板材料の温度上昇が減少することは、金属プレートが熱の吸収に寄与しているものと思われる。

蒸着源と基板間距離を70mm、プレートの穴径Hを4mm ϕ 、およびプレートの厚さtを1mmと一定にし、蒸着源と金属プレート間距離Lを変化させた時の輻射熱による基板材料の温度変化をプレートを使用しない場合の温度上昇と比較測定したのが図5である。L=10mmまではほぼ一定値約60%を示すが、L=10mm以下になると減少が生じ始め、40~50%まで減少する。金属プレートの種類による温度低減の差は、L=10mmまではあまり大きな変化はなく10mm以下になると差が生じ始める。プレートの厚さ1mmの場合には、Cu, Al, Feの順に基板温度上昇が小さくなっている。マイカの場合にはLの変化に対する温度減少はほとんど生ぜず、L=0mmにおいてもL=20mmに比べて数%の減少しか生じない。L=0mmの場合は蒸着源フィラメントの下側の面と、プレートの上面が同一面にある場合で、プレートの中央に穴があけてあるのでフィラメントとプレートは接触していない。

今度は金属プレートの表面積をそのままにし厚さtを変えた場合の基板の温度上昇の変化をプレートを使用しない場合と比較してみると図6のようになる。これはL=0mmの場合でプレートの体積が大きくなると輻射線による基板材料の温度上昇が小さくなって行く。Feとマイカの穴径4mm ϕ のものが一番減少率が大きく、同じ4mm ϕ の穴径でもCuおよびAlでは減少はわずかである。また穴径が大きい場合にも減少は少ない。これらの温度減少がプレートの材質と穴径によって異なっているの、プレートによる温度上昇の低減は遮蔽による効果だけでないことが分かり、プレートの熱容量、プレートの厚さtの増加による熱放射面積の減少などが複雑

に関係しているものと思われる。

5mm厚の金属プレートにおいて蒸着源とプレート間距離Lによる基板材料の温度を調べてみると図7のようになる。穴径が4mm ϕ ではCu, Alにおいては、蒸着源に接近させても温度減少は少ないが、Feの場合にはL=10mm以下で減少が生じ始め、L=0mmで約35%程度減少する。穴径が10mm ϕ の場合には、Al, Cuでは効果はないが、Feでは同じくL=10mm以下で減少が生ずる。しかし穴径が小さなものより効果は少ない。

これらのようにプレートによって基板温度上昇が減少する理由は、プレートによる熱遮断によることは明らかであり、金属プレートの場合、その材質の熱伝導率の大きさの順、即ちCu, Al, Feに従って減少効果が大きくなっている。しかし熱伝導率のみによる効果ならば上記金属に比べ熱伝導率が極めて小さなマイカ板の場合には、大きな減少効果が生じて良いはずであるが、金属板のような効果は生じない。そこで蒸着源フィラメントに通電加熱中の各種プレートのフィラメントに向いている面と下側の表面温度を測定してみると、L=1mm穴径4mm ϕ の場合には図8のような結果となり、プレートの上下表

Fig. 5 Relation between diminution in temperature and distance L.

Fig. 6 Relation between diminution in temperature and volume of plate.

Fig. 7 Relation between diminution in temperature and distance L.

Fig. 8 Change in upper and lower side temperature of plate during deposition.

面温度が高いほど基板材料温度の減少効果が大きいたことがわかる。マイカ板の場合には上面温度は高いが下側は極めて低い温度となっている。

5mm厚、穴径4mmφの鉄プレートにおいてプレートの上面および下面の温度からプレートの平均温度を算出し、蒸着源とプレート間距離Lとの関係を調べてみると、L=10mm以下においてプレートの平均温度が急上昇している。これは図7のL=10mm以下において基板材料温度の減少が大きく生じていることと一致している。

図8において蒸着源からの放射エネルギーが一定にもかかわらず、プレートの温度上昇がプレートの材質の比熱値に従っていないのは、プレート表面の表面仕上状態による放射熱の反射係数の違い¹²⁾によるものと思われる。これは金属プレートによる放射熱の吸収を良くするため鉄プレートの表面を黒色処理すると基板材料の温度減少効果は更に大きくなる³⁾ことから考えられる。

これらの結果より蒸着源と基板材料の中間に、蒸着源から離れた位置(10mm以上)に金属プレートを置いた場合には、蒸着源から放射される放射線の照射面積制限とある程度の金属プレートによる放射線の吸収、反射によって基板材料の受ける放射線量が少なくなるが、金属プレートを蒸着源に接近(10mm以下)させると、放射線の照射面積が広がるにもかかわらず、金属プレート特に鉄プレートによる放射線の大きな吸収によって基板材料の受ける温度上昇が小さくなる。したがってこの金属プレート方式(L:10mm以下)と従来からある遮蔽板方式を組合せると更に放射熱の影響を少なくすることができる^{3), 11)}。また遮蔽板方式による照射面積を制限する方法に比べ、金属プレート方式では蒸着可能面積が極めて大きい利点がある。

4. 形態係数による考察

放射伝熱に関する計算には形態係数¹⁸⁾の値を知ることが重要であり、この実験においても形態係数から金属ブ

Fig. 9 Relation between geometrical view factor F_{13} (from filament to substrate) and distance L, plate volume, hole diameter.

レート方式および遮蔽板方式による放射熱低減の現象を考察してみた。形態係数を求める際、計算を簡単にするため蒸着源フィラメントは直径5mmの円板に、金属プレートは実験に使用したプレートと同面積の円板、即ち直径6cmの円板として計算した。形態係数は放射率には無関係¹³⁾であるので金属プレートの反射率は1とした。

この場合、蒸着源から放出される熱放射の内、金属プレートに到達するものの割合(形態係数) F_{12} は、

$$F_{12} = \frac{1}{A_1} \int_{A_2} \int_{A_1} \frac{\cos \phi_1 \cos \phi_2}{\pi S^2} dA_1 dA_2 \quad (4-1)$$

dA_1 : 蒸着源の微小面積

dA_2 : 金属プレートの微小面積

S : dA_1, dA_2 を結ぶ直線の長さ

$\phi_1 \phi_2$: dA_1, dA_2 の各垂線と直線Sのなす角であり、これを積分すると、

$$F_{12} = \frac{1}{2} \left\{ 1 + \left(\frac{R_2}{R_1} \right)^2 + \left(\frac{L}{R_1} \right)^2 - \sqrt{1 + \left(\frac{R_2}{R_1} \right)^2 + \left(\frac{L}{R_1} \right)^2} - 4 \left(\frac{R_2}{R_1} \right)^2 \right\} \quad (4-2)$$

となる。ここで R_1 : 蒸着源フィラメントの半径, R_2 : 金属プレートの半径, L : 蒸着源~金属プレート間距離である。このエネルギー等量関係および形態係数の総和関係から蒸着源から基板材料に到達するエネルギーの割合 F_{13} は、

$$F_{13} = 1 - F_{12} \quad (4-3)$$

となる。

蒸着源から20mmの位置に実験に使用した金属遮蔽板を置いた時の形態係数 F_{12} は4-2式より $F_{12}=0.7065$ と

なる。この金属板の中央に $1\text{mm}\phi\sim 10\text{mm}\phi$ の穴をあけた場合、先の F_{12} は変化が生じ、4-3 式に従って計算すると、蒸着源から遮蔽板の穴を通して基板材料に到達するエネルギーの割合 F_{13} は図 9 の○印のグラフのようになる。これから F_{13} の値は穴径を変えても大きく変化せず、これは蒸着源と基板材料の間に遮蔽板を置き、遮蔽板の穴径を小さくしても輻射熱低減の効果が小さいことを示している。

次に穴径を $4\text{mm}\phi$ のまま金属プレートを蒸着源に近づけて行った時の形態係数 F_{13} の変化を 4-2, 4-3 式で計算すると図 9・印のグラフのように変化している。これは先の遮蔽板を置き穴径を小さくした場合の F_{13} よりも変化が極めて大きくまた F_{13} の値の低減が大きい。これは遮蔽板方式よりも金属プレート方式の方が基板の受ける輻射熱の低減が非常に大きいことを示している。

次に金属プレートの厚みを変えた時の F_{12} , F_{13} を計算してみる。蒸着源とプレート間距離 L に対してプレートの厚み h が無視できなくなるので計算式は、

$$F_{12} = \frac{1}{2} \left(\frac{L+h}{R} \right)^2 \left\{ \sqrt{1 + \left(\frac{2R}{L+h} \right)^2} - 1 \right\} \\ - \frac{1}{2} \left(\frac{L}{R} \right)^2 \left\{ \sqrt{1 + \left(\frac{2R}{L} \right)^2} - 1 \right\} \dots\dots (4-4)$$

となる。 R : 蒸着源フィラメント源の半径
蒸着源とプレート間距離 L を 1mm 、穴径を $4\text{mm}\phi$ とし、プレートの厚みを $1\sim 5\text{mm}$ に変化させた時の F_{13} の変化は 4-4, 4-3 式より図 9 の×印のグラフに示す。これからプレートの厚みを厚くすると金属プレートを接近させた場合よりも F_{13} の変化は小さいが、遮蔽板方式よりも変化が大きく、かなりの輻射熱の低減が生ずることがわかる。

この形態係数を計算するに当たり、基板材料に入る輻射線の内、ベルジャーに反射されて入るもの、金属プレートが加熱されて、それから入るもの等の形態係数は一定としたが、計算した形態係数の変化は実験で求めた輻射熱の低減結果と傾向が良く一致しており、遮蔽板による輻射熱の低減よりも金属プレートによる方が、また厚みを大きくした方がはるかに効果が大きいことが良くわかる。

5. 結 言

この金属プレートによる輻射熱の低減は、遮蔽による輻射熱低減の特性を測定中に判明したもので、遮蔽による方法よりも効果が大きいことが実験および形態係数の

算出によって明らかになった。これはプレートによる輻射熱の吸収によるものである。また輻射熱の低減のみでなく蒸着中の他の輻射熱特性も改善できる⁹⁾ことが判明している。これを用いることにより低温で変形する物質にも金属コーティングが可能であり、電子顕微鏡で調べてみると寒剤を用いずに低温で変形を生ずるプラスチック、チーズ、チョコレート等にも熱変形させることなく金属コーティングが十分可能である^{9), 11)}。なお実際の蒸着においては蒸着物質が金属プレート表面に厚く附着し、時間の経過と共にプレートの輻射熱反射吸収係数が変化したり、蒸着物質の種類によってそれらが変わってくるので、鉄プレートが最適であるとは一概に言えなくなってくると思われる。

(1978-3-29 受理)

文 献

- 1) 日本学術振興会編；薄膜工学ハンドブック，p-1-99 (1964, オーム社)
- 2) 小坂雅夫；蒸着中の基板材料の温度上昇，本誌，**29**, 344 (1978)
- 3) 小坂雅夫；真空蒸着中の輻射熱とその低減について本誌，**28**, 330 (1977)
- 4) 小坂雅夫；スリットを用いたシャドーイングの特性，工学院大学研究報告，**37**, 7 (1974)
- 5) 小坂雅夫；スリットを用いたシャドーイング法，J. Electron Microscopy, **18**, 195 (1969)
- 6) 日比忠俊；ノズル系を用いるメタリックシャドウカスティングについて，電子顕微鏡，**2**, 121 (1952)
- 7) R.C. Williams, R.C. Backus；The Electron-Micrographic Structure of Shadow Cast Films and Surfaces., J. Appl. Phys., **20**, 98 (1949)
- 8) D.E. Bradley；High-resolution Shadow-casting Technique for the Electron Microscope using the Simultaneous Evaporation of Platinum and Carbon, Brit. J. Appl. Phys., **10**, 198 (1959)
- 9) 難波義捷；蒸着中の金属薄膜の温度上昇，応用物理，**38**, 411 (1969)
- 10) 若島久男；真空蒸着時の試料の温度上昇，応用物理，**22**, 246 (1953)
- 11) 小坂雅夫；蒸着中の試料温度，工学院大学研究報告，**41**, 1 (1976)
- 12) 沢田正三；温度と熱，p.59 (1970, 共立出版)
- 13) 日本電熱工学委員会編；工業電気加熱ハンドブック，p.33 (1968, 電気書院)
- 14) 内田秀雄；伝熱工学，p.336 (1976, 裳華房)