

EA 20 形 電 子 線 蒸 着 装 置

Type EA 20 Electron Beam Evaporator

森 金 太 郎* 田 村 一 二 三**
Kintarô Mori Hifumi Tamura

要 旨

最近エレクトロニクス関連技術の発展に伴い、高純度材料、絶縁材料、合金など複合材料および高融点物質などの真空蒸着が要求される情勢にかんがみ、研究室向きの小形高性能低価額の電子線蒸着装置 EA 20 形を試作商品化した。本装置は逆散乱電子の除去、交流加速電源の検討、ピアス電子銃の検討などの基礎的な実験結果に基づき、研究開発したもので、その他の点でも多くの特長をもち、各種蒸着材料について応用試験を行なった結果も良好な成績を示した。

1. 緒 言

従来の抵抗線加熱真空蒸着法は、加熱源が W, Ta などの抵抗線の電氣的発熱によるため、2,000°C 程度の温度しか得ることができず、高融点材料の蒸着は不可能であった。また抵抗線自体が赤熱するため抵抗線材料の蒸気がでたり、反応性蒸着材料と反応し、純度の高い薄膜を得ることが困難であった。

最近特にエレクトロニクス方面において小形回路部品や集積回路に薄膜の技術が取り入れられ、大きく発展し、特に Ta などの高融点物質や、Si, Ge, SiO₂ などの高純度の薄膜が要求されているが、一般の抵抗加熱法では困難な状況にある。これに対し電子線蒸着法は電子の運動エネルギーを直接、熱エネルギーに変換するため、熱効率がよく、またルツボなどを使用しなくてもよいため高純度の薄膜を得ることができる特長がある。さらに電子線衝撃では急激に温度を上昇させるので、合金を蒸着する場合にも、その組成割合を変えずに行なうことが可能である。

しかし、最近市場に出始めている電子線蒸着装置は従来の抵抗加熱式の蒸着装置に対して数倍の価格にも達し、これが装置の普及をはばむ原因になっている。また性能的にも逆散乱電子により蒸着膜にき裂を生じ、必ずしも十分ではなかった。このような情勢にかんがみ逆散乱電子を防止する構成をもち、従来にない新しい種々の機構を折り込んだ研究室向きの小形高性能低価格の装置の開発を行なった。

2. 電子線蒸着法の原理および構成

電子線蒸着法は電子線を高電圧で加速して蒸着物質に衝突させ、電子の運動エネルギーを熱エネルギーに変換し、蒸着物質を熔融蒸発させ、被蒸着試料上に薄膜を作るものである。装置の一般的な構成は図 1 に示すようにカソード(フィラメント)から放出された電子がウェーネルト電極とアノード間に印加された高電圧によって加速され、電子レンズによって集束されて高い電子密度をもって蒸着物質を衝撃加熱する。電子線の照射によって加熱され、蒸気となった蒸着物質の一部は被蒸着試料の基板表面に到達し薄膜を構成する。

装置内は 10⁻⁵ ないし 10⁻⁷ mmHg の真空度に保たれている。

3. 新しい電子線蒸着装置の開発に関する基礎実験

3.1 逆散乱電子の影響とその除去

電子線による蒸着は抵抗加熱式蒸着法に比較して前記のように多くの特長をもち一方また欠点もある。それは電子線が蒸着材料を衝撃するとき、蒸着材料の表面から逆散乱電子が放出されて、その

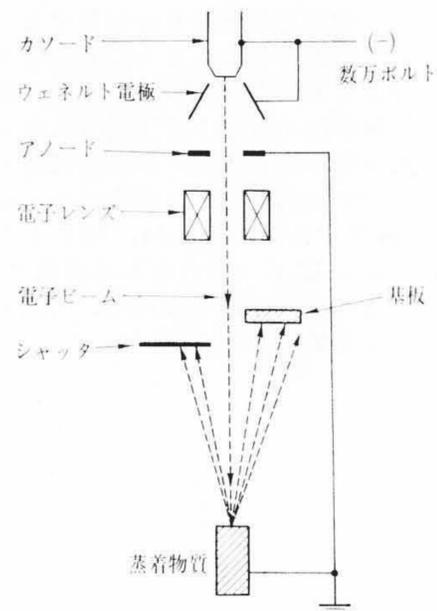


図 1 電子線蒸着装置の一般的構成

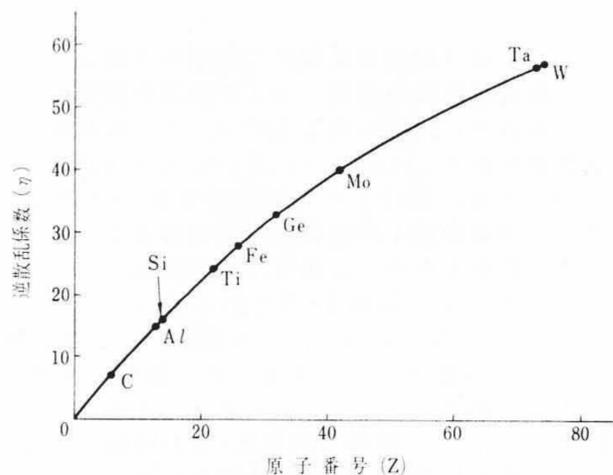


図 2 原子番号と逆散乱係数の関係

一部が絶縁物の基板に到達し、基板が電荷を帯びて薄膜に樹枝状のき裂がはいったり蒸着ムラが生じたりする現象である。

逆散乱電子 (back scattered electron) は入射電子とほぼ等しいエネルギーをもつ反射電子と数 10 eV 以下のエネルギーの 2 次電子からなる。また入射 1 次電子に対する逆散乱電子の比を逆散乱係数 η と呼び、一般に原子番号 Z が大きいほど、 η は大きくなる (図 2 参照)。

図 3 は逆散乱電子の影響を示したもので、図 3 (a) はシリコンをガラス板に蒸着したもので、また同図 (b) はボロンを蒸着したもので、どちらも拡大して調べるとガラス基板上の薄膜にき裂がはいっている。これは絶縁物である基板に逆散乱電子が蓄積されて高電位になり、周囲の低い所に放電を生じ、薄膜に樹枝状のき裂がはいったものである。また図 3 (c) はタンタルをガラス板に蒸着したもので、

* 日立工機株式会社

** 日立製作所中央研究所

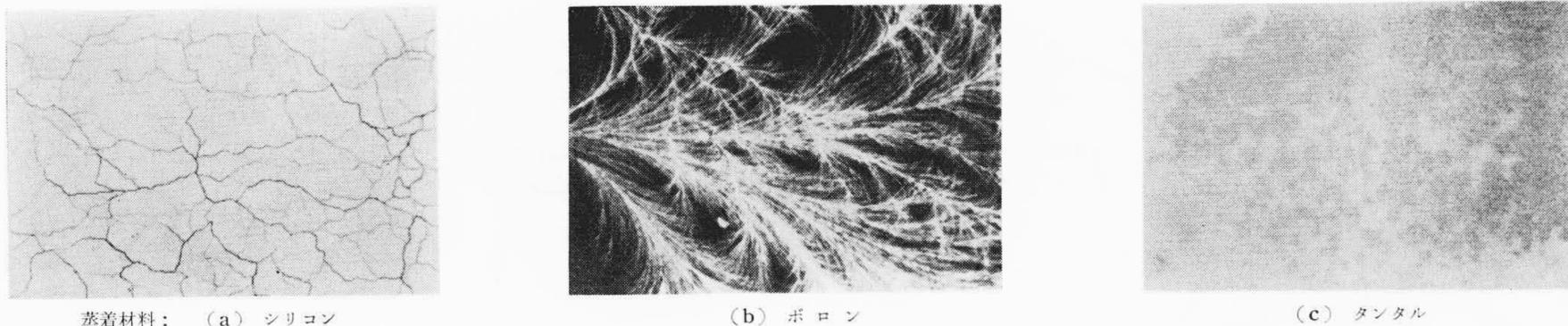


図3 逆散乱電子の影響

表1 逆散乱電子の影響

基 板	蒸 着 材 料	影 響
伝 導 体	伝 導 体	逆散乱電子の影響なし
	絶 縁 体	蒸着膜を厚くすると膜が荒れる
絶 縁 体	伝 導 体	膜に濃淡(ムラ)ができる
	絶 縁 体	樹枝状のき裂がはいる

ムラが生じているのがみられる。これらのき裂と蒸着ムラは基板と蒸着材料が絶縁物であるか金属であるかによって表1のようにその影響が分類される。

以上の結果から良好な蒸着膜を得るためには逆散乱電子を除去することが必要であることが明らかとなった。このため電子銃の構成を従来と変更し、カソード(フィラメント)およびウェネルト電極を接地電位とし、アノードを正の高電位とし、アノードの下に中央に電子線を通す金属製の円筒を設けた。外周の真空槽を金属製とした場合、蒸着物質から放出される逆散乱電子は中央の金属円筒でトラップされる。この状況は抵抗回路網による電子軌道の追跡により明らかとなった。図4はその計算の一例で加速電圧20kVの場合における真空槽内の等電位面と電子軌道を示している。

図から明らかのように、逆散乱電子の多くは中央の円筒(ビームトラップ)に吸収され基板には到達しない。実際に使用する場合には基板支持台とシャッタが接地電位にあるため、電子軌道はさらに曲げられて基板に達するものはほとんどなくなる。

3.2 交流加速電源の検討

電子線加熱には従来連続ビーム(直流)を使用するのが普通であったが、装置の簡易化と小形化のため整流回路を省略し交流高圧で使用した。ただし実際には電子線はカソードに対しアノードが正電位になった場合のみ放出され、いわゆる半波整流波形になる。

交流半波方式にするに当たって電子線の衝撃時の温度を理論的に検討するとともに実験も行なった⁽¹⁾。

パルスビームと連続ビームとでは照射によって得られる加熱温度がどのように違うかについて考えてみる。ここでは最も簡単な形の表面発熱の場合について、Jeager氏⁽²⁾、谷口氏⁽³⁾らにより行なわれた計算式を使用し、種々の金属について計算し、直流出力の場合と比較してみた。

図5は電力(W)と時間(t)の関係の一例を示したもので、同時に交流出力を直流出力に換算した(電力を等しくする)場合の平均電力(a)も示した。交流出力による波形は(b)に示すような形になるが、簡単のためこれを高さと同面積の等しい方形波(c)におき換えて計算した。

さて、半無限固体の蒸着材料に直径2aの電子ビームがQ(cal/s)の電力でステップ状に投射され、それが表面で全部熱に変換される場合、ビームの衝撃面に垂直な中心表面上の温度(v_n)はJeagerの式から次のようになる。

$$v_n(0, t) = \frac{Q}{\pi Ka} \left(\frac{1}{\sqrt{\pi}} \frac{1 - e^{-\alpha^2}}{\alpha} + \operatorname{erfc} \alpha \right) \dots \dots \dots (1)$$

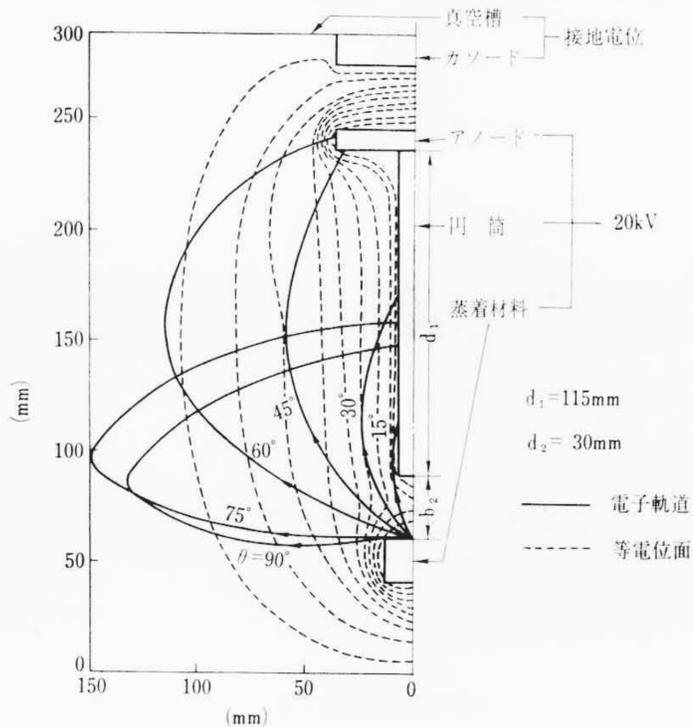


図4 等電位面と逆散乱電子の軌道

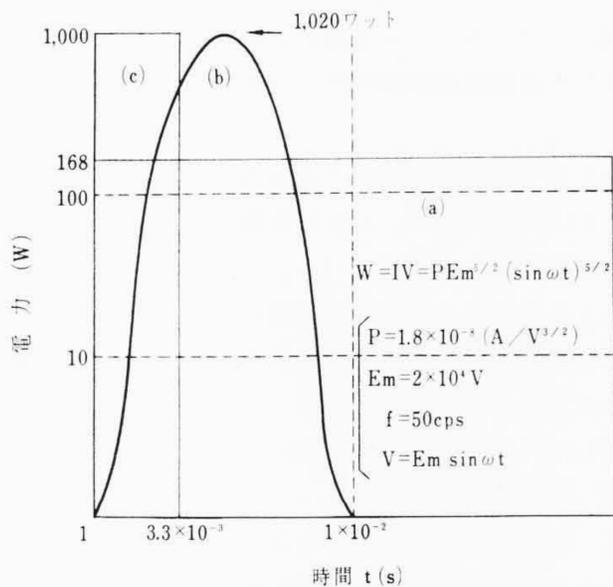


図5 電力(W)と時間(t)の関係の一例

ここに、 $\alpha = \frac{1}{2\sqrt{\pi}} (T_c/t)^{1/2}$

$T_c = \pi a^2/k$

K: 熱伝導率 (cal/s. cm. °C)

k: K/ρc 温度拡散率 (cm²/s)

ρ: 密度 (g/cm³)

c: 比熱 (cal/g. °C)

t: 時間 (s)

上式を用いて Ni, W, Cu について計算した結果を図6に示す。表面温度は熱伝導度の悪い金属ほど高く、Ni, W, Cu の順である。また、連続ビームとパルスビーム間の温度差は熱伝導の悪いほど大きい。

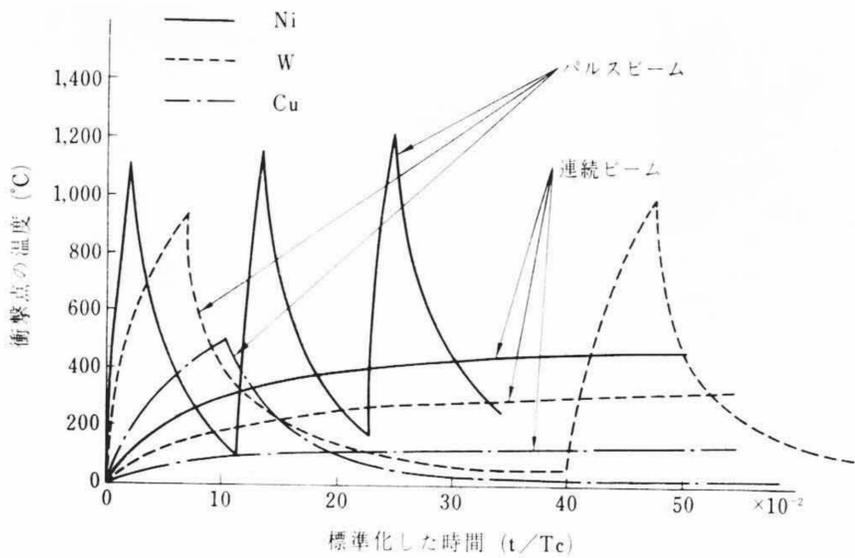
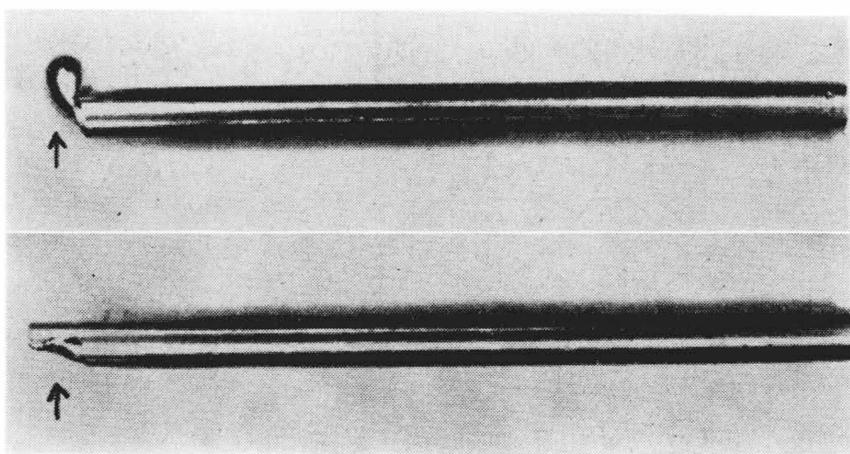


図6 パルスビームと連続ビームの熱効果の比較例



(試料: 6mmφ純鉄)
 (a) 交流ビーム: 交流加速電圧 15 kV 電子電流 20 mA 照射時間 2分
 (b) 直流ビーム: 直流加速電圧 15 kV 電子電流 20 mA 照射時間 2分

図7 棒状材料の蒸着例

また同図からパルスビームを用いた場合、連続ビームで照射したときに比較して表面温度が瞬間的には約4倍に上昇しているのがわかる。

以上はあくまで理想状態における計算例で、実際の表面温度を正確に知ることは困難である。しかし実際に連続ビームとパルスビームとの照射を比較したときに、パルスビームによる照射のほうが連続ビームによる場合より局部的に高温にすることが容易であることは実験的にも明らかであった。図7に蒸着材料として直径6mmの純鉄を用いた場合の例を示す。交流ビームで照射した場合は溶滴とならず蒸発していることが写真の例から明らかである。

3.3 ピアス形電子銃

従来の電子線蒸着装置には電子レンズを使用し電子線を集束していたが、価格および操作の簡易化のためこれを省略することを試みた。このため電子銃として大電流で集束性のよいピアス形を使用することにした。アノードとカソード電極を同心球にすると、Langmuir と Blogett によって求められた近似的な電流方程式を使用して、加速電圧と電子電流の関係を知ることができる。しかし内面を球状に加工する困難を避けて、カソード電極は図8のように円すい形にし、アノードも比較的簡単な形にした。

図8においてカソード電極の開き角 ϕ は電子線の集束に関係する。理論的には $\phi=67.5$ 度が最もよいが、カソード電極の中心孔その他の影響で、実際にはいくぶん小さくなると考えられる。 $\phi=67.5, 65, 60$ 度の3種について実験を行なった。その結果 $\phi=65$ 度ときに蒸着材料面で最もよく電子線が絞られて2mmφの径が得られた。ただしカソード、ビーム照射面間の距離は200mm、カソードとアノード間の距離は25mmとし加速電圧は15kVと20kVについて実験を行なった。また、フィラメントには電子放出面積が 2.5×2.5

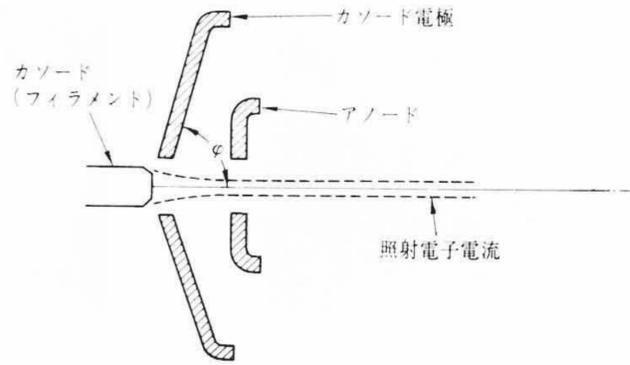


図8 試作ピアス銃の電極構造

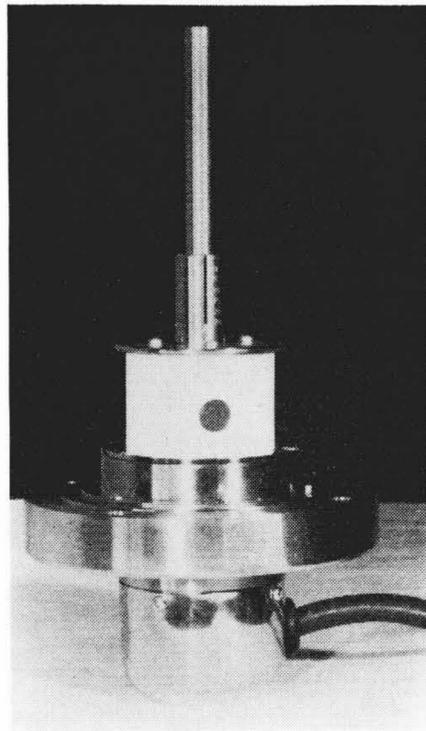


図9 試作した電子銃

mmで厚さ 50μ のタンタル板を用いた。パービアンズ p を求めると、カソード、アノード間距離 d_{a-c} が20mmのとき、 $p=1.75 \times 10^{-8} \text{ A/V}^{3/2}$ 、 d_{a-c} 25mmのとき、 $p=1.05 \times 10^{-8} \text{ A/V}^{3/2}$ となった。

図9に試作電子銃の外観を示す。前記のようにカソードは接地電位側で使用されるため、高圧絶縁ケーブルなどを使用する必要がない点は取扱いのうえで便利である。

4. 新しい電子線蒸着装置 (EA 20 形) の設計および試作

以上のように基礎的実験を行なった結果、従来にない次の三つの大きい特長を見いだすことに成功した。

- (1) 逆散乱電子を除去する構造
- (2) 交流加速電源の採用
- (3) 電子線を遠方集束できるピアス形電子銃の使用

その他蒸着材料、被蒸着試料の形状性質に応じ、電子銃と蒸着材料を上下任意に交換できる構造とすることを考慮し、次の仕様をもつ新しい装置を設計試作した。

4.1 設計仕様

電子銃	ピアス形電子銃, 真空槽の上下に取付交換可能, 逆散乱電子防御付き
加速電圧	0~20 kV 連続可変 (交流半波)
電子電流	最大 50 mA
電子線径	2 mmφ
真空槽	直径 300 mm × 高さ 330 mm, SUS 27 製
排気系本体	400l/s 油拡散ポンプ, 250l/min 油回転ポンプ
真空度	1×10^{-6} mmHg (1時間) 液体窒素使用, コールド・トラップ付き
冷却装置	真空槽側壁と下部に水冷用銅管付き

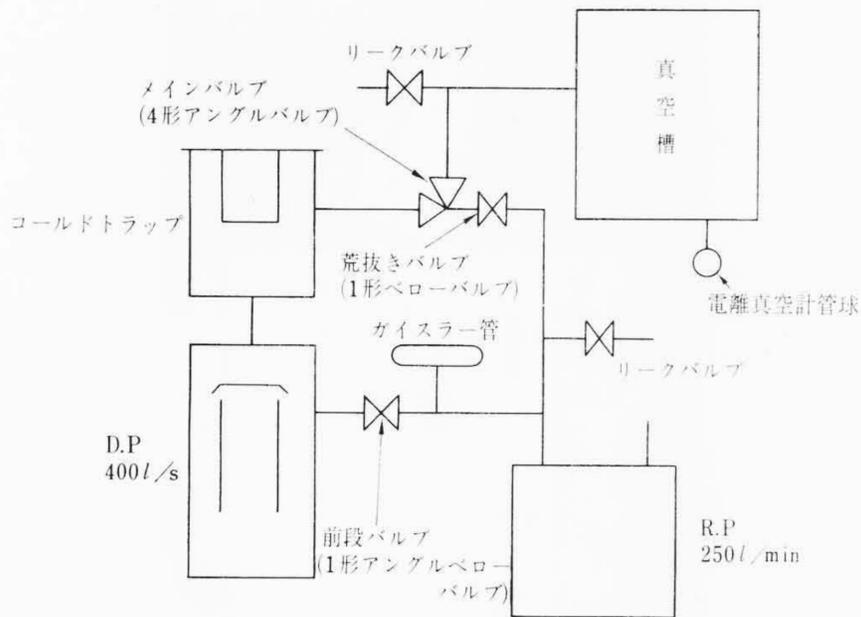


図 10 真空排気系統図

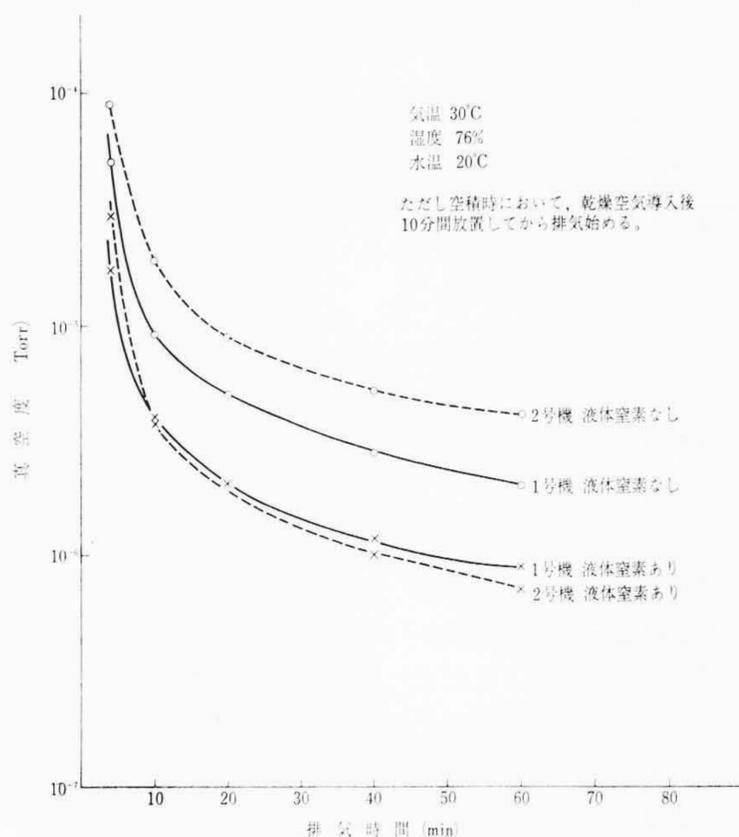


図 11 真空排気特性の一例

- 大 き さ 横 940 mm × 奥行 740 mm × 高さ 1,400 mm
- 重 量 500 kg
- 内 部 構 造 サブストレイトホルダ(加熱ヒータ付き 4個)
シャッタ
メルティングポット (Ta ルツボ使用)
チャックホルダ(蒸着材料をつり下げる)

4.2 各部構造

4.2.1 真空排気系

一般に真空蒸着装置の半分は排気系統で占められ、排気速度、到達圧力はその装置の性能を決定する重要な要素となる。この装置では1時間の排気で 10^{-6} mmHg 台の蒸着が行なえるように油拡散ポンプと油回転ポンプの容量をそれぞれ選んだ。図 10 はこの装置の真空排気系統図を示したもので、図 11 は真空排気特性の一例を示したものである。

4.2.2 真空槽の構造

真空槽は直径 300 mm 高さ 330 mm のステンレス鋼の円筒で試料の出し入れは前面のドアを開いて行なう。このドアにはX線の漏えいを防ぐための鉛ガラスの窓がある。ベースプレートを広く生かすため、排気口は横に取り付けられている。

図 12 に示すように電子銃は真空槽の上部と下部とに取り付け

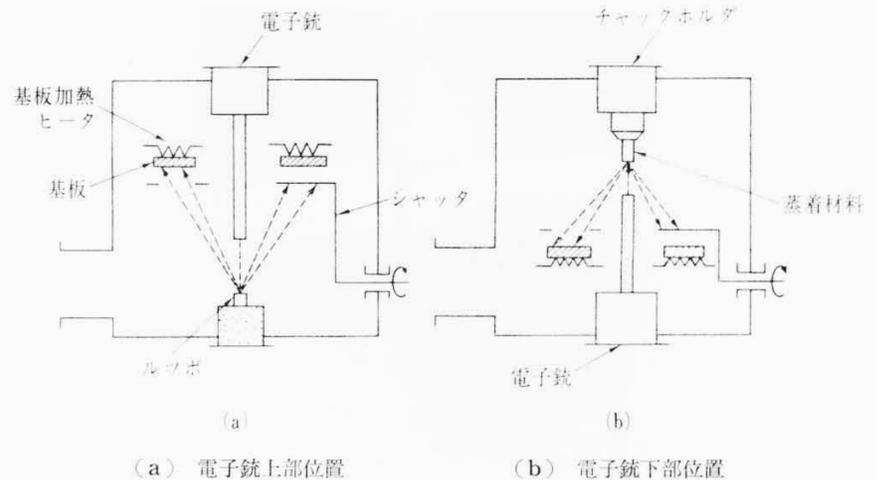


図 12 真空槽の構造図

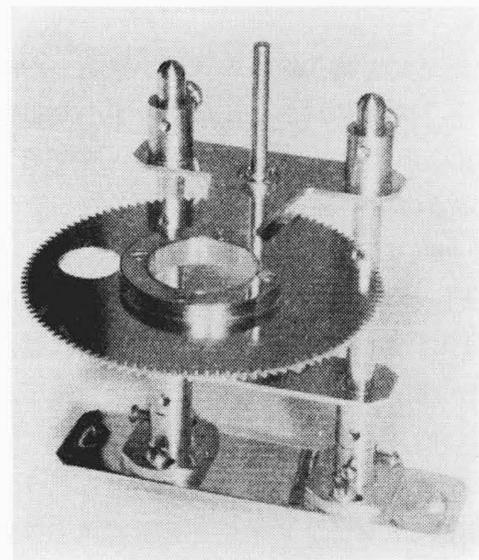


図 13 シャッタ

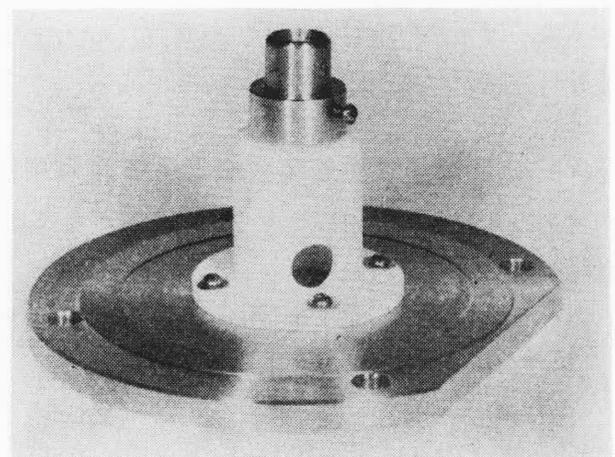


図 14 蒸着材料保持器 (ルツボ)

交換可能である。これは蒸着材料、基板の種類、形態によって電子銃の位置を選ぶためである。

基板支持台には加熱ヒータがついており 400~500°C くらいまで加熱できる。基板は 20mmφ の大きさのものを 4 個取り付けるが、顧客の要求により特殊設計のものも取り付けることができる。

シャッタは基板の 1 個を選択して蒸着できるようになっており、図 13 のように羽根の高さを変えることができる。電子銃の位置を上下に変換したときに羽根の位置を変える必要が起きるが本装置では簡単にできる。図 14 に蒸着材料を保持するルツボ、図 15 にチャックホルダの外観を示す。前者は電子銃を上部に配置した場合、後者は下部に配置した場合にそれぞれ対抗位置におかれる。

4.2.3 電気系

一般に電子線蒸着装置では直流高圧で電子を加速するが本装置では交流加速方式を採用した。このため電子銃関係の電源は小形になり排気系とともに架台の内部にまとめることができた。また

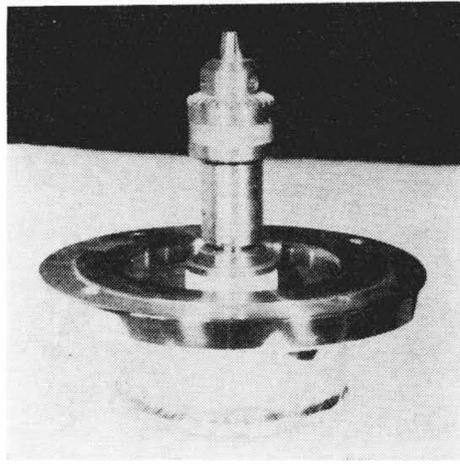


図15 蒸着材料保持器の外観図
(チャックホルダ)

陰極接地にしたため、電子銃へのフィラメントの導入線は接地側になり、アノードと蒸着材料に印加する正の高電圧を真空槽内がい子で導入した。このため装置の外部に高圧導入線はまったく出ていないので取扱い上の危険はまったくない。

4.3 総合構成

図16に試作装置の外観を示す。装置の大きさは幅940mm×奥行740mm×高さ1,400mmでテーブル上に真空槽があり、向かって左側に真空排気系が格納され、その操作のための真空バルブのハンドルが前面に出ている。

また右側に高圧電源トランス、フィラメントトランスなどの電源が収容され、加速電圧およびフィラメント電流の制御のノブが前面に取り付けられている。装置の中央部のパネルは簡単に取りはずすことができ電子銃を下部に取り付けることを容易にしている。真空槽内のすべての操作は正面窓から行なうことができる。真空槽の右側にシャッターハンドルが出されている。被蒸着基板は窓の前方に引き出して取り付けるので操作はきわめて容易である。

5. EA 20 形電子線蒸着装置による各種応用例

EA 20 形電子線蒸着装置を用いてガラスの基板上に金属、半導体、および化合物の蒸着を行なった。

金属: Al, Ti, Cr, Mo, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Ga, Zr, Nb, Ag, Cd, In, Sn, Ta, Re, Pt, Au, La, Ce, Sm, Eu,

半導体: B, C, Si, Ge,

化合物: ZnS, ZnO, SiO₂, SiO, SnO₂, CdS, AgBr, AgO

いずれの場合も蒸着膜に逆散乱電子によるき裂、むらなどがまったく認められず一様な膜が得られた。また従来の抵抗加熱法では不

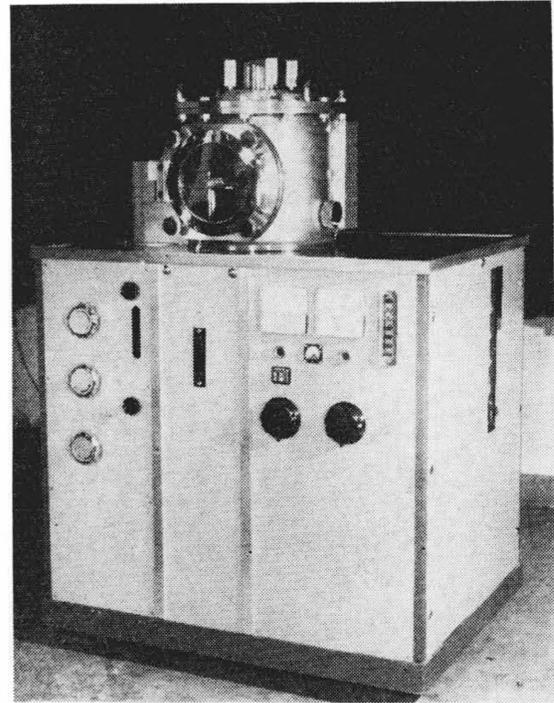


図16 EA 20 形電子線蒸着装置の外観

可能な Ta, Nb, Ti などの蒸着を行ない、電子顕微鏡により高拡大して検討した結果では粒子が非常に小さく、試料作製用に適していることが明らかとなった。

6. 結 言

現在国内では外国品も交えて数社から電子線蒸着装置を発表しているが、EA 20 形は逆散乱防止装置、交流加速、その他電子銃の上下位置交換可能など他社にない多くの特長を備えた装置である。

従来の装置のほとんどすべては逆散乱電子により蒸着膜のき裂、ムラを生じている点で本装置はきわめて大きい特長をもっており輸出への期待も大きい。

薄膜工学は基礎研究の段階から応用研究あるいは製品化への段階に移ってきてはいるが、まだまだ発展段階の研究も残っている。したがってこれに活用される電子線蒸着装置としても、常に新しい研究成果をとり入れ、最新の装置として発展させるよう計画している。

最後に本装置の開発にあたり種々ご示唆をいただいた電気通信研究所の小野員正氏、そのほかのかたがたに厚くお礼申しあげる。

参 考 文 献

- (1) H. Kimura, H. Tamura and K. Mori: Proc. Electron and Laser Beam Symp., Pennsylvania, p. 369 (1965)
- (2) Jeager, J.C and Carslaw H.S: Conduction of heat in solids oxford p. 264 (1959)
- (3) 谷口ほか: Proc. E. B. Symp. 5th Ann Meet p. 135 (1963)