

14 KW 电子枪

唐惠平

(北京仪器厂 北京 100022)

TN103

摘要 本文简要介绍了 QE14-40/1A 电子枪的结构、性能和特点, 给出了电子偏转速率半径以及偏转磁场与电流的关系曲线。

关键词 电子枪 结构 性能 偏转磁场 电子轨迹 蒸发速率 膜厚均匀性

1 前言

北京仪器厂于 1996 年研制了高功率的 QE14-40/1A 电子枪, 并配套应用于 ZSX-800 镀膜机。作为电子学工业中快速蒸发 Al (99.99%)、Al-Si (99:1)、Al-Cu (96:4) 和 Al-Cu-Si (94.5:4:1.5) 或蒸发高熔点金属材料如 W、Ta、Mo、Nb 等, 是一种较为理想的蒸发源和镀膜设备。

QE14-40/1A 电子枪 (EBG), 其最大功率为 14kw, 坩埚容积为 40ml, 在距离为 250mm 处, 铝的蒸发速率可达到或超过 $3.5\mu\text{m}/\text{min}$; 电子枪安装在真空室直径为 800mm 的 ZSX-800 箱式真空镀膜机中。电子枪和真空室的内部布局保证了铝的快速沉积、良好的膜厚均匀性, 并提高了薄膜对基片的附着力。

2 主要技术性能和特点

2.1 主要技术性能

额定输出功率 14 KW
加速电压 -10 KV DC
电子束流 0~1.4 A
电子束偏转角 270°
束斑面积 $1.0\sim 1.5\text{ cm}^2$
灯丝加热 10V AC, 40 A max

偏转电流 0~2 A DC (4.1Ω)
坩埚容积 40 ml
电子束扫描 x-y
冷却水流量 $\geq 14\text{ L}/\text{min}$ ($\varnothing 10\text{mm}$)
蒸发速率 (Al, 250 mmH)
 $> 2500\text{ nm}/\text{min}$

2.2 结构及性能特点

QE 14-40/1A 电子枪包括二极管电子源、枪体、主偏转磁极靴、偏转线圈及扫描组件、水和电馈入等。

2.2.1 二极管电子源

该电子源包括灯丝、束成形极、阳极和绝缘件等。灯丝和束成形极同处负值高电位, 阳极接地电位, 形成了制约的带状电子注。

2.2.2 枪体

枪体包括坩埚自成一体 (见图 3), 简化了结构, 避免多件组合所造成的密封不良装配误差。考虑到蒸发温度为 $1000\sim 1100^\circ\text{C}$ 的铝对坩埚体的腐蚀作用, 坩埚冷却采用侧面环形水冷回路。同时, 为满足厚膜 ($> 10\mu\text{m}$) 制备及保持靶料液面高度恒定 (从而蒸发速率和蒸发角恒定), 坩埚斜壁上备有送料孔。

2.2.3 偏转线圈及磁极靴

偏转线圈采用空密封式结构, 单端引出

线圈与主极靴构成使电子束沿 y 方向偏转的磁场,使电子束沿曲率半径为 $R = 3.37 \times V^{1/2}/B$ 的轨迹飞行。电子束偏转 270° 角后入射坩埚,并利用其非均匀磁场将电子注聚焦成束。

为了充分利用电子枪功率和保证有效的蒸发速率,选择电子束功率密度是必要的,尤其是蒸镀合金铝如 $Al-Si$ 、 $Al-Cu$ 、 $Al-Cu-Si$ 。由于 Al 的蒸发速率比 Cu 快 2 倍, Al 与 Si 的蒸发速率比约为 800:1,过小的束斑面积(功率密度过高)会造成合金元素的分解,使得膜层成分与靶材成分不一致。因此,附加了一对辅助极靴,旨在展长束斑长度,达到高功率与快速蒸发的效果。

2.2.4 扫描组件

QE 14-40/1A 电子枪的偏转线圈兼作 y 方向扫描功能,置于枪体后部, X 方向扫描组件在枪体前部电子束通道口处。

扫描目的也是为了改变束斑面积,以达到稳定的最佳蒸发速率。

对于蒸镀熔融状态的金属材料,电子束扫描频率应尽可能地高,比如 $100 \sim 400 \text{ Hz}$ 效果较佳。由于熔融状态的金属材料导热性能较好,慢的扫描频率不但不能提高蒸发速率,往往会适得其反。

2.2.5 高压馈入电极

该电极采用同轴电缆式的金属—陶瓷密封结构,电极下部引入部分有绝缘和屏蔽保护装置,电极上部引出部分有防污保护。

2.2.6 高能散射电子收集极

当高能电子入射坩埚靶材时,将产生二次电子、背散射电子和反射电子,例如 Al 的反射系数约为 15% (垂直入射状态),反射电子能量与入射电子相当,这些高能电子的收集效果直接影响着膜层的质量。

QE 14-40/1A 的磁场布局保证了高能散射电子的全部吸收,从而确保膜层的高质量。

3 样机调试与设计参数的比较

QE 14-40/1A 电子枪首次安装于 ZSX-800 镀膜机,联合调试 14 KW 一次成功,其他技术叙述于下:

3.1 电子枪灯丝加热的伏—安特性

灯丝设计是由 $\varnothing 0.80 \text{ mm}$ 钨丝 (WAl_2) 绕制成螺旋管状、展开长度 12.4 cm (含两灯丝腿裸露部分)、有效发射面积约为 0.72 cm^2 ,计算出发射电流密度为 1.94 A/cm^2 ,最高工作温度约为 2700°K ,加热电流和电压分别为 38 A 和 9.4 V (考虑到冷端效应修正)。

实测结果

电流 $I_c(\text{A})$	10	15	20	25	30	35	40
电压 $V_c(\text{V})$	~0.2	0.8	1.8	3.8	5.8	7.9	10

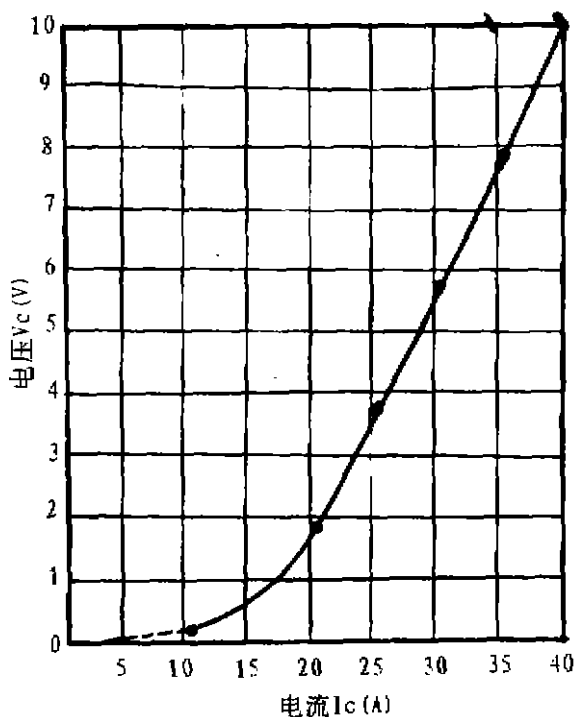


图 1 灯丝加热伏—安特性

3.2 偏转磁场和电子轨迹

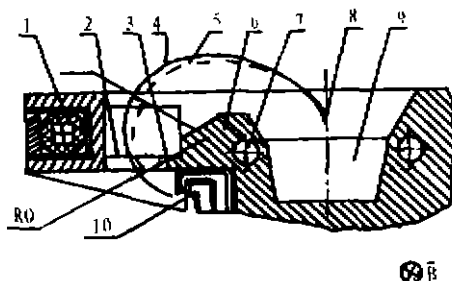
考虑到电子枪外形尺寸及电子注聚焦因素,偏转磁场设计分为似均匀场和非均匀场两部分。在电子源灯丝至电子束通道口之间,磁场近似均匀场(见图2),电子轨迹基本上符合公式 $R = 3.37 \times V^{1/2} / B$, 由灯丝至坩埚位置的结构设计限定,似均匀场中电子轨迹的曲率半径 $R \approx 3.0$ cm, 即磁场 $B = 0.0112$ T (112 GS), 偏转电流计算值为 $I_d = 1.08$ A (磁耗系数取值为 1.5 时)。

在电子束通道口 A 点处(见图2)磁场的测量结果:

电流 I_D (A)	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0
磁场 B_A (Gs)	19	38	55	73	97	115	131	142	148	154

当加速电压 $V = 10$ KV 时,实际使用的偏转电流 $I_d = 0.87$ A, 则 $B_A = 92$ GS (0.0092 T)。工作点的计算值与实测值分别示于图3中的 Q 点和 P 点,则实际曲率半径为 $R \approx 3.6$ cm。

电子束偏转曲率半径的计算和实测结果示于图2。



- 1. X方向扫描组件
- 2. 电子束通道
- 3. 磁场测量点
- 4. 实际电子轨迹
- 5. 设计电子轨迹
- 6. 电子枪枪体
- 7. 环形水冷通道
- 8. 进料孔
- 9. 40ml坩埚
- 10. 电子枪灯丝

图2 QE 14-40/A 电子枪轨迹(主线)

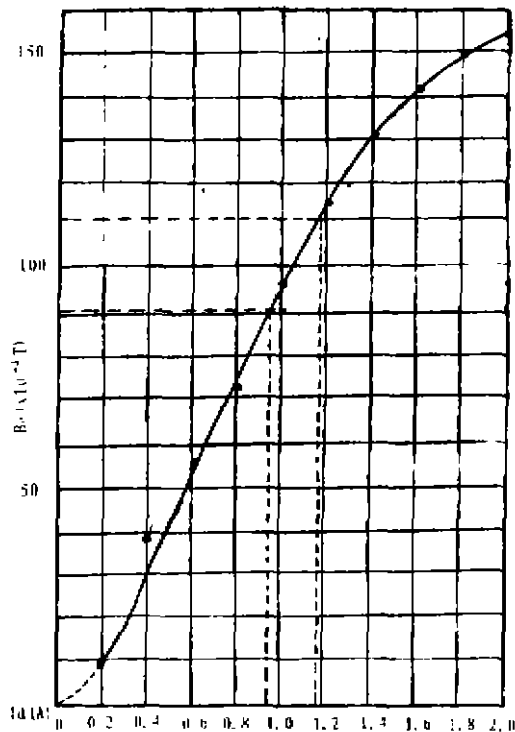
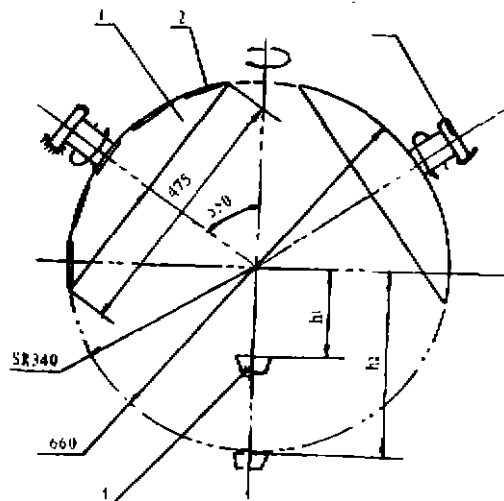
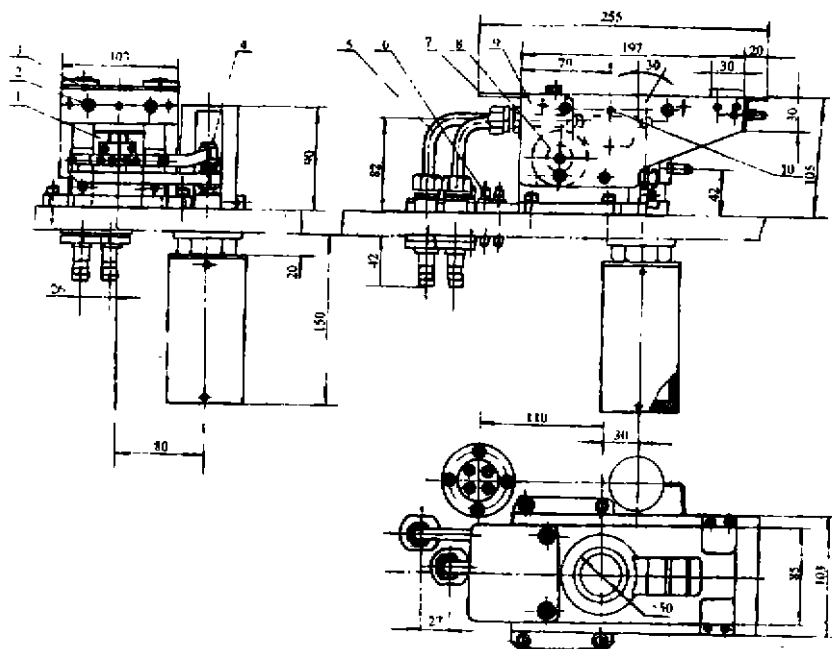


图3 偏转线圈电流 I_d 与 A 点磁场 B_a 的关系



- 1. 工件盘(3片)
- 2. 基片(里、中、外)
- 3. 自转滚轮
- 4. ZSX-800 蒸发源位置($h_1 \approx 1/2$ SR)
- 5. "面源置球面"蒸发源位置($h_2 = SR$)

图4 ZSX-800 球面行星夹具与蒸发源布局



1. 二极管电子源 2. X方向扫描组件 3. 辅助极靴 4. 两芯高压电极 5. 冷却水接头 6. 四芯低压电极 7. 散射电子收集极 8. 偏转兼y方向扫描线圈 9. 偏转主枰靴 10. 丝状料添加孔

图5 QE 14-40/1A 电子枪

3.3 电子束斑面积

设计指标为 $1.0 \sim 1.5 \text{ cm}^2$, 实际测量结果是:

当不使用辅助极靴时, 束斑面积为 $0.8 \sim 1.0 \text{ cm}^2$; 使用辅助极靴时, 束斑面积为 $1.2 \sim 1.44 \text{ cm}^2$ 。

3.4 蒸发速率及膜厚均匀性

3.4.1 标准高度 250 mm 处的沉积速率

国外用于蒸铝的 14 KW 电子枪, 蒸发速率为 $(3600 \sim 5000) \text{ nm/min}$, 本厂生产过的 10 KW 电子枪蒸发速率为 $(1500 \sim 2000) \text{ nm/min}$ 。由于蒸发速度受许多因素所限制,

如电源质量、真空度、坩埚容量、水冷效果、束斑位置以及坩埚是否加衬套等。

QE 14-40/1A 电子枪设计速率指标为 $\rho > 2500 \text{ nm/min}$, 实测值为 $\rho > 35000 \text{ nm/min}$ (配用 10 KV DC 开关型高压电源)。

3.4.2 在工件盘上的沉积速率

ZSX-800 镀膜机工件盘为三片 $\varnothing 475 \text{ mm}$ 组成的行星球面夹具。电子枪功率为 10 KW、12 KW 和 14 KW 时的沉积速率分别为 350 nm/min 、 607 nm/min 和 808 nm/min 。用户使用功率 10 KW 时, 沉积速率为 330 nm/min , 与测试结果很接近。

3.4.3 膜厚的均匀性

为了降低电迁移效应和蚀刻后几何形状

的再现性,电子学镀铝的膜厚均匀性误差应 $\leq \pm 5\%$ 。

对于行星球面夹具,多数设计者在布局蒸发源位置时,均按“点源置球心、面源置球面”的规则,将电子束蒸发源按“面源置球面”布局,即将蒸发源置于球体最低端。这种布局虽然也能满足均匀性要求,但是,由于沉积速率与距离平方成反比,“面源置球面”布局必然增大了蒸发距离而降低沉积速率,造成材料浪费。

电子束蒸发时,蒸汽“云”呈“梨形”分布,在坩埚上方几厘米处形成一个等离子层,故蒸发源既非点源而非面源。因此,考虑到靶材的利用率并兼顾膜厚的均匀性,在顾及蒸发挡板有效遮挡和开关行程范围前提下,将蒸发源尽量靠近球心而按图4布局。

实际测量膜厚均匀性时,夹具公转速度为8.5 r/min,测得球面工件盘上里、中、外三处的膜厚均匀性误差为 $\delta = \pm 2.86\%$,完全可以满足使用要求。

4 结论

QE 14-40/IA 电子枪的研制结果与设计要求基本相符。主要成功之处在于电子束运行轨迹、束斑限定、灯丝加热、沉积速率和膜厚均匀性等主要技术参数均接近或超过设计指标。

电子束偏转磁场和电子轨迹的计算值与实际值的误差,主要是由于计算时磁耗系数选值1.5过高,若取值为1.3即与实际结果就十分接近。

参考文献

- [1] Electron beam gun ESQ300v operating instruction. Balzers, BB 800069 BE Issued: Dec. 1975/DN 6633
- [2] Full-automatic rapid Vacuum Coater, QVICK-VAC - IOD. ULVAC Corporation, No. SQ40-0318. P10
- [3] Technology of electron beam Evaporation for thin film production. Leybold - Heraeus GMBH. SGZ. 81.
- [4] Technology of Simultaneous Evaporation With Electron Beam Guns for Metallization of Semiconductor Devices. B. Heinz. Leybold - Heraeus GmbH, Hanau, FRG.
- [5] 应根裕主编.《电子光学》.清华大学出版社,1984:11
- [6] 徐淦卿 陈德森编著.《电子管》上册.上海科学出版社,1963.

作者简介



唐惠平,男,1939年12月生,福建惠安人。教授级高工。1965年毕业于福州大学无线电物理系电子物理专业,毕业后主要从事真空镀膜机中电子束蒸发源、真空电子束焊接机电子枪、扫描电子显微镜电子光学镜筒等主管设计,发表过专业文章5篇。1992年荣获机械电子工业部“有突出贡献专家”称号,1995年获北京市优秀科技工作者二等奖,1996年被北京仪器仪表控股集团授予“真空应用电子枪专业首席专家”称号。