

低气压水冷空腔电弧阴极研究*

王殿儒

田大准

(中国科学院力学研究所)

(北京光电技术研究所)

本文介绍低气压水冷空腔电弧阴极的设计原理和实验结果。该冷电弧阴极在发射电流为150安培情况下已累计运行100小时以上并可继续运行。所设计的冷电弧阴极在用于全金属结构氙离子激光器和离子镀膜装置中时,均取得成功结果。

一、前言

作者在1980年初开始进行全金属结构氙离子激光器研制和离子镀膜技术研究工作中,迫切感到急需得到一个低气压连续放电条件下能够稳定提供连续10—200安培电流并且对工作气氛污染小,使用寿命足够长的阴极发射源。在分析比较了各种阴极之后认为,水冷空腔式冷电弧阴极在本文所讨论的低气压范围内具有独特的优点和潜在力。研究它的结构原理和工作特性,探讨其发射机理,解决其连续发射大电流的稳定性问题,减少阴极对环境的污染并提高其寿命,制成可供应用的器件,无疑是一个有意义的课题。

二、阴极选择

高功率氙离子激光器有许多实际应用及科学价值^[1],其器件研制工作中要解决的关键之一是稳定连续发射大电流的阴极问题。根据我们所确定的分段金属铝片放电管,当管径为 $\phi 8$ 毫米,有效长度为300毫米、600毫米、1000毫米时的要求,其阴极应能在充气压力为 5×10^{-1} — 5×10^{-2} 托情况下,可靠连续发射20—200安培电流,并且不污染激光腔和窗片、耐离子轰击、无中毒问题及有足够长的寿命。

作者在离子镀膜技术工作中,原使用HCD热中空阴极作为蒸发离化源,它作为一种热阴极不但寿命短(一般为几小时到十几小时),而且使用昂贵的钽管,造价高。作为离子镀膜使用的阴极源应能在 10^{-2} — 10^{-4} 托的气氛(N_2 、Ar)下,稳定提供几十至几百安培电流,不污染镀膜室并且具有足够长的使用寿命。

在阴极电子学领域中,可供在电真空和低气压小电流条件下使用的各类阴极,发展比较成熟,已形成了系列^[2]。

在常压电弧与热等离子体发生器领域中,一些能够提供大电流的热阴极和冷阴极,技术上也发展得较为成熟^[3]。

表1列出了几种可供参考的低气压电弧阴极。其中各种旁热式阴极在真空度较高时均具有较好性能。但在本文所述低气压和所使用的电流范围内都有一定缺点。如,纯钨阴极能发射所需的电流,但由于发射效率很低,致使耗费在灯丝上的加热功率很大。钽钨阴极及氧化

*1983年10月4日收到。

物阴极的电子发射效率虽比纯钨阴极高许多,但在目前实际应用中,这类阴极发射电流还低于100安培,不但制造工艺较复杂而且在大电流时耐正离子轰击和抗中毒能力均较差,使用寿命有限。文献^[4]所列的阴极虽使用了发射面积为95厘米²的特殊形式,也仅能提供80安培电流。

表1 不同类型阴极特性

序号	类型	结构特征	发射电流(安)	最大可用发射率(安/cm ²)	抗中毒	正离子轰击性能	发射效率(毫安/瓦)	工作气压范围托	对空气污染情况	参考文献
1	旁热式纯钨阴极		300	15	好	好	~10	<1	少	8
2	旁热式筒状阴极 Ni80%, CaCO ₃ 10%, SrCO ₃ 10%		80	0.9	较好	可以	~50	<1	少	4
3	直热式钍钨阴极		40~60	2	较好	可以	最大 300	<1	少	9
4	直热式 氧化物阴极		100	0.5	不好	不好	250	<1	少	10
5	自加热棒阴极		200	~100	好	好	/	~>5 × 10 ⁻²	有一定 污染	3
6	自加热锆阴极		200	~100	好	好	/	~>5 × 10 ⁻²	较少	3
7	水冷柱(管)阴极		1000	~100	好	好	/	~>5 × 10 ⁻²	较大	3
8	气冷微孔阴极		1000	~100	好	好	/	~>5 × 10 ⁻²	有一定 污染	3
9	自加热中空阴极		1000	~100	好	好	/	~>5 × 10 ⁻²	少	11
10	水冷空腔阴极		1000	~100	好	好	/	~>5 × 10 ⁻²	少	7

表1中5~10所列的各式自加热、水冷、气冷的电弧阴极,均具有能提供足够的发射电流,有较好的抗离子轰击能力等优点,但5—8各式电极对放电气氛的污染是应用中的严重障碍。表一中9为自加热的中空阴极,其污染较少,但其寿命较短。文献^[7]报道的一种空腔电弧阴极使用范围在 1×10^{-1} 托以上,还不能满足上述两项课题的要求,但就其原理是非常有前途的一种低气压大电流放电阴极。

三、水冷空腔电弧阴极的设计原理和结构特征

用于全金属结构氙离子激光器^[5]和离子镀膜装置^[6]的空腔冷电弧阴极的原理图示于图1(A,B)。

冷电弧阴极设计采用了带衬套的水冷金属结构。由简单的水冷杯状金属空腔的内表面作为阴极发射面。其空腔冷电弧阴极腔尺寸为 $\phi 45$ 毫米 \times 55毫米。

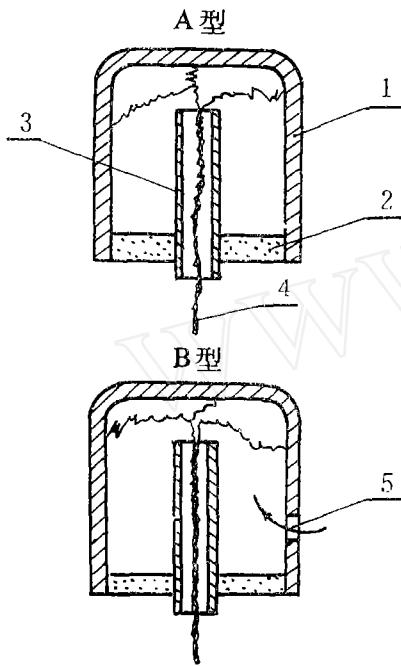


图1 冷弧阴极原理示意图

1. 水冷阴极腔; 2. 绝缘垫; 3. 自加热衬套; 4. 电弧柱; 5. 氙气进气口

冷电弧阴极是一种具有无规则运动的有斑阴极,这与通常的以无斑热发射为主的阴极设计不同,不能根据理论或实验的电流密度数据计算阴极所需的发射面积。因为有斑阴极很小的阴极面积,原则上可以提供实际所需要的任意电流,其冷电弧阴极的设计主要考虑散热、烧蚀、污染、限制弧斑运动、稳定电弧及电弧启动方便等因素。

空腔的存在,在一定条件之下,有利于控制弧斑的运动和提高阴极区的电离。空腔形状也有利于阴极金属蒸汽的再凝结和减少对放电正柱区的污染。为了使等离子体能够进入空腔,引起空腔效应的激发,应该满足:

$$L_k \leq R \quad (1)$$

的条件。(1)式 L_k 为阴极位降区的尺度, R 为空腔的半径。在本文选择的空腔内气压高于 1×10^{-2} 托时,可近似满足条件(1)。

根据第二类边界条件(即热流 Q 等于常数)的定常热传导计算,当阴极提供150安培电流时,通过阴极空腔壁耗散的功率小于3千瓦,在每毫米无氧铜制的阴极腔壁内实际温度梯度小于 2°C ,设计选用壁厚3毫米,总温度梯度小于 10°C ,在阴极弧斑以外的绝大部分的阴极表面都处于良好的冷却状态,这有利于金属蒸汽的再沉积。

设计中的衬套是一个耐高温的金属管(Ta, Mo),它在阴极工作中起重要作用,主要是:(1)加强了阴极的自恢复作用,提高阴极寿命,减少对放电正柱的污染。该金属衬套被当地弧柱所释放的焦耳热所加热,并主要以热辐射的方式把热量辐射给阴极壁。根据热平衡计算,可以把衬套的温度控制在阴极材料的熔点之上。由阴极斑烧蚀和溅散出的阴极材料蒸汽,在遇到被加热的衬套时,就不会在其上沉积,而被它反射回阴极腔,并沉积到阴极斑以外的冷却的阴极表面而沉积下来。这样,既防止了金属蒸汽跑出阴极腔,减少了对正柱区的

污染,又增加了阴极自恢复能力,提高了使用寿命。其衬套直径主要是工作电流的函数。(2)衬套对一段放电正柱区产生压缩和约束的作用,对阴极的工作有两种有利影响,其一是减少甚至消除阴极弧斑运动对放电有效正柱区稳定性的影响;其二是由于在衬套两头部形成的半球形电双鞘层因而对阴极电流产生所希望的自聚焦作用。考虑到由于电双层的存在,正离子的轰击将导致管口的烧蚀破坏,设计中采用了激光器放电管两端的喇叭口设计原则。

四、实 验

所设计的如图1(A,B)同一种两个不同应用场合的冷电弧阴极,在低气压连续放电的氩激光器及离子镀装置中都取得成功。在 $\phi 8 \times 300$ 毫米分段金属铝片结构氩离子激光器上,当放电电流120安时,输出激光4瓦。在VMY-600型离子镀膜机上,当放电电流为150安时,可镀仿金氮化钛(TiN)表壳200支,其冷弧阴极具有足够长的寿命。

1. 引弧方法和燃弧范围

在 $\phi 8 \times 300$ 毫米的氩离子激光器实验中,采用一台实验室现有的硬外特性600伏、300安电源为主弧电源,在回路内串联一个镇流电阻 R_0 (参见图2),使之在通过 R_0 之后形成一个下降的特性。采用另一台硬外特性的1500伏2安电源为引弧电源,串入一个镇流电阻 R_1 。引燃电弧的方法是采用高低压电源交接的方法,可以实现放电由辉光转为弧光的平滑过渡。将放电金属管道充分去气后,充入 $1-5 \times 10^{-2}$ 托的高纯氩,即可引燃电弧。针对其伏安特性,

将引弧电源电压提高到 V_1 时,即可开始正常辉光放电,进一步提高到 V_2 时开始向异常辉光放电转变,电压送到 V_3 时,则放电不能稳定在C点,而是突然过渡到D点,此时电流突增至 I_D ,电压突降至 V_D ,即所谓实现了由辉光向弧光的转变。为使主弧电源开始放电,还必须进一步提高引弧电压,降低放电电压,当其电压高于 V_4 ,相应放电电压降至低于 V_E 时,主弧电源即可开始放电,并迅速过渡到它的稳定放电工作点F。向弧光转变的最高电压除决定于结构和真空度而外,对系统中残余气体的不纯度有很大关系,杂气多,则转弧电压高。 $\phi 8 \times 300$ 激光器的转弧电压为600~1000伏, $\phi 8 \times 600$ 激光器的转弧电压为800~1200伏。

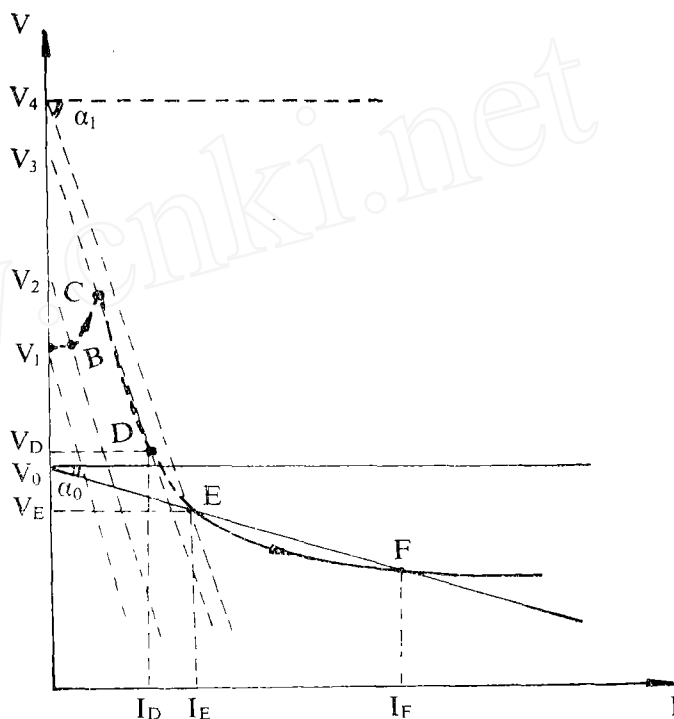


图2 冷弧阴极放电伏安特性及引燃电弧过程
实线表示主弧电源特性和电弧伏安特性;
虚线表示引弧电源特性和引弧过程伏安特性;
 $\alpha = \arctg R_1$; $\alpha_0 = \arctg R_0$

在冷电弧阴极离子镀膜技术中,同样采用过上述引燃电弧的方法。在生产性的 VMY-600 离子镀膜样机上使用的引弧方法略有不同,为了降低成本和电耗,选用了空载电压较低的陡降外特性电源为主弧电源,为此将引弧电源的电流范围提高到 5 安,达到了使两电源在更低的电压下互相交接的目的。

低气压放电冷电弧阴极燃弧范围是气体压力、气体成分、电极结构、材料性质和电弧电流的函数,其中气压的影响最大,本研究的阴极结构在高纯氩气氛下的燃弧范围在 $3-6 \times 10^{-2}$ 托以上。如图 3 所示。为使冷阴极电弧放电能够应用于离子镀技术所要求的压力范围 $10^{-2}-10^{-4}$ 托,如图 1 (B)所示,将镀膜机的氩气进口设置在阴极内,借助自加热衬套的作用,形成一个气体差压,使阴极在镀膜室处于 $10^{-2}-10^{-4}$ 托时仍在其本身的燃弧范围之内。

2. 冷电弧阴极的绝缘方法

为使选定结构尺寸的阴极能稳定放电,需在兼顾耐热、密封要求的同时,有效地解决其真空电绝缘问题。绝缘结构方式示于图 4,其绝缘包括两个方面。其一是阴极体和工作室之间的绝缘,选用聚四氟乙烯和可加工的熔铸云母为绝缘材料,借助前者的可塑性兼顾真空密封的要求;其二是阴极与自加热衬套之间的绝缘。此处热负荷强度很大,温度很高,在结构设计和材料选择方面均有较高要求,曾实验用熔铸云母、微晶玻璃、叶蜡石等材料,均未能同时承受住绝缘、耐热和密封的要求,后采用耐温达 2600°C 的氮化硼作为绝缘材料取得成功。在阴极应用于镀膜技术时,其绝缘件的设计还采用了适当的缝隙,以避免导电膜的生成导致的绝缘破坏。

3. 冷阴极对工作环境的污染

冷电弧阴极采用了自加热衬套,从理论上克服了污染问题,但还必须由实验加以证明。我们对冷弧阴极内表面做了三种不同处理:

- (1) 阴极内表面涂复一层稀有金属铋;
- (2) 阴极内表面为无氧铜;
- (3) 阴极内表面加一层钛衬套。

阴极内表面涂铋是为降低电子逸出功。实验表明涂铋的阴极起辉电压较低。实验观察到涂 Bi 层较厚时,多余的金属铋会飞出阴极腔。由于激光器阴极与放电管垂直 90° 度安置,并且设计了过渡腔,从而避免了阴极溅射物质污染窗片。即使如此,还必须严格控制铋层的厚度。实验认为,在阴极腔内局部一点铋就能达到降低阴极起辉电压的目的,并且不致造成过渡腔污染。阴极内表面是无氧铜的冷弧阴极作为离子镀源时,用 EDAX-711 型 x 射线能量散射谱仪进行成分分析。结果证明,该阴极所镀样品上未发现有冷弧阴极内的金属元素如 Ta、Cu、Mo 等(见图 5)。图 6 示出阴极内表面加钛衬套的离子镀氮化钛样品的散射谱。钛衬套的冷弧阴极在工作状态下,由于弧斑造成的钛金属的蒸发,因而对系统内残余气体来说,起到了钛泵作用。

4. 冷弧阴极寿命实验情况

用于离子镀技术的冷弧阴极,在 150 安培的放电电流下进行镀 TiN 实验,已累计运行 50 小时以上,并仍在使用中。用于氩激光器的冷弧阴极,在 20—150 安的不同放电电流情况下,已累计运行大于 100 小时,尚未发现阴极内表面有明显的消耗。

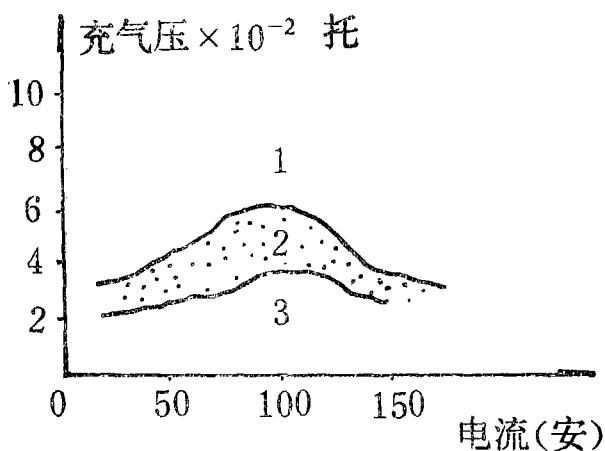


图3 冷弧阴极(A型)的燃弧范围

1. 稳定燃弧区; 2. 失稳区; 3. 灭弧区

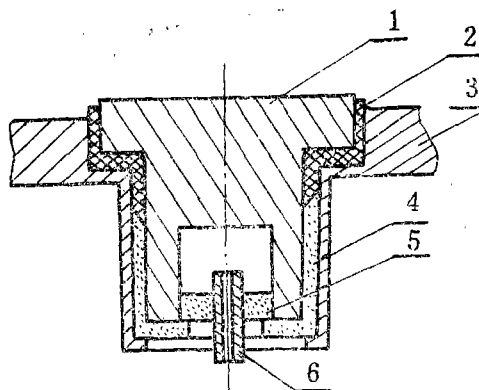


图4 阴极的绝缘方法

1. 水冷空腔阴极; 2. 聚四氟乙烯绝缘密封; 3. 镀膜室或激光器; 4. 熔铸云母绝缘; 5. 氮化硼绝缘和密封; 6. 耐高温自加热衬套

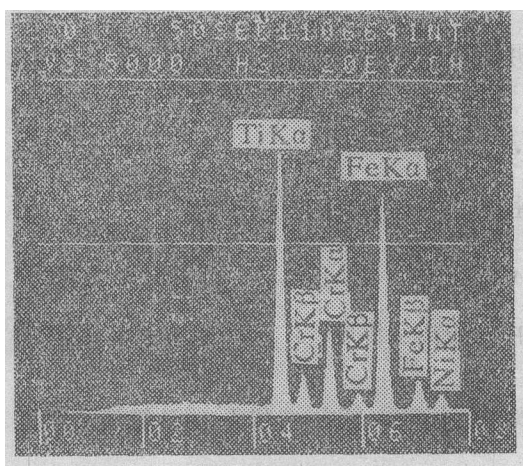


图5 冷弧阴极离子镀膜氮化钛样品
散射谱分析(无氧铜阴极)

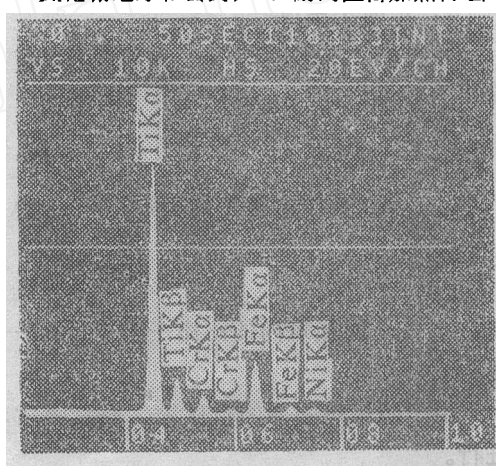
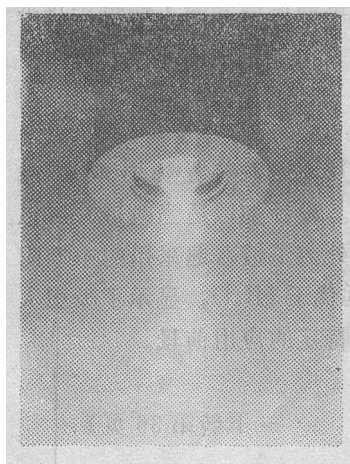


图6 钛衬套冷弧阴极离子镀膜氮化
钛样品散射谱分析



冷弧阴极在VMY-600离子镀膜机上, 150安培电弧放电的情况如图7照片所示。

五、关于水冷空腔电弧阴极的发射机制

空腔冷电弧阴极的发射机制包括场致自电子发射, 正离子电流、空腔效应和某些次级电子发射。可表示为:

$$I = I^- + I^+ + \sum I_{\text{次}} + \Delta I \quad (2)$$

式中 I ——总电流; I^- ——阴极的场致自电子发射电流, $I^+ =$

图7 冷弧阴极放电 150安培情况

$j^- \Delta S$, j^- ——自电子发射密度, ΔS ——参与发射的总阴极斑面积; I^+ ——正离子电流; $I_{\text{次}}$ ——次级发射的电流; ΔI ——由空腔效应增加的电流。在本阴极条件下, 前两项是主要的。

1. 场致自电子发射

场致发射理论认为, 强电场可降低阴极表面势垒的高度和改变阴极表面外势垒的形状, 使阴极内的电子可不待外加能量而逸出金属表面。对于典型的光滑表面来说, 可以计算, 当阴极表面的电场强度为 $E = 10^6 \sim 10^8$ 伏/厘米时, 其自电子发射的电流密度可达 $j^- = 10^5 \sim 10^8$ 安/厘米²。

水冷空腔电弧阴极的总电压只有 50 伏左右, 按经典场发射理论计算的自电子发射量趋近于零。其自电子发射的产生是因在冷阴极表面高速徘徊的阴极斑的作用而造成的。阴极斑是冷电弧阴极的发射的源泉。阴极表面绝大部分处于冷却状态, 而在尺寸很小的高速运动的阴极斑内却呈现很高的电流密度、电位梯度、粒子密度、气体压力, 使弧斑传热传质异常激烈, 微区烧蚀溅散严重, 出现高密度、高电离的弧斑, 造成很高的正离子堆集, 从而在微区内形成足以造成自电子发射的强电场, 形成所需的自发射电流。

2. 正离子电流

与自电子发射的同时, 离子电流在冷电弧阴极的总电流中也占有相当的比重。不同作者给出的结果为:

$$f = \frac{j^+}{j} \approx 10 \sim 50\% \quad (3)$$

式中 f ——正离子流密度的份额; j ——总电流密度; j^+ ——离子电流密度。

$$j^+ = \frac{en^+}{4} V_+ = \frac{en^+}{4} \sqrt{\frac{8}{\pi} \frac{KT_+}{M}} \quad (4)$$

其中 n^+ ——阴极斑内的正离子密度; T_+ ——斑内的正离子温度; V_+ ——正离子的热运动速度。

由于阴极斑强烈的自压缩、质量喷射和无规则的移动, 斑内 n^+ 和 T_+ 的计算还不能可靠进行。

由弧斑造成的场发射和正离子流作用二者相互制约和增强, 严格的理论应联立求解。

有关水冷空腔电弧阴极发射机制较为详细的讨论曾在第二届全国低温等离子体科学技术交流会上发表。

六、低气压冷弧阴极的应用前景

本文所述的一种低气压连续电弧阴极, 应用于氩离子激光器及离子镀装置中均取得成功。从而代替了传统的热阴极, 并具有经济、坚固、简单的特点。设计加以适当改进, 可以与玻璃、石英封接, 将可用于相应的热阴极装置中, 与目前国内外离子镀普遍采用的中空阴极(HCD)相比, 在相同的镀膜效果情况下, 冷弧阴极工作寿命远优于 HCD, 显示了吸引人的前景。此阴极对于真空等离子体冶金、焊接和表面处理也具有特定的应用前景。

(下转第 36 页)

(上接第80页)

$$m = \frac{I_g}{I_{max}} \quad (\text{个}) \quad (44)$$

其中 I_g 一见公式 (42); I_{max} 一见公式 (43)。

四、结 语

本文是根据本人讲稿的内容, 经节选而写成。真空感应炉的内容非常丰富, 本文因受篇幅所限, 在内容的取舍上, 以及在问题的阐述上, 都不一定妥当, 更由于水平所限, 一定会存在不少缺点与错误, 敬请批评指正。

参 考 文 献

- [1] 天津大学等院校, 化工机器及设备(上), (1962)
- [2] 东北工学院真空教研室, 真空应用设备(东北工学院教材), 上册, (1979)
- [3] 孙殿君, 低压容器设计(讲稿)
- [4] 孙殿君, 真空感应炉(东北工学院教材)

(上接第24页)

参 考 文 献

- [1] 田大准、王殿儒, 激光与光学, 2(1981)
- [2] 张恩虬, 电子学通讯, 4, 1(1982)
- [3] 王殿儒, 电弧加热器二十年, (1979)
- [4] Experimentelle Technik elec. Physik, 22, 3(1974)
- [5] 田大准、王殿儒等, 中国激光, 10, 3(1983)
- [6] 王殿儒等, 真空, 5(1982)
- [7] В.И. Донин, Квантовая Электроника 6, 2(1979)
- [8] С. Р. Wang, Appl. Phys., 43, 12(1972)
- [9] 陈振庭, 电子学通讯, 2, 4(1980)
- [10] 南京电子管厂, 应用激光, 1, 2(1981)
- [11] J. R. Morley and H. R. Smith, J. Vac. Sci. Technol. 9, 6(1972)

INVESTIGATION OF WATER COLD CUP SHAPE ARC CATHODE AT LOW PRESSURE

Wang Dian-ru

(Institute of Mechanics Academia Sinica)

Tian Da-zhun

(Beijing Institute of Optics and Electronics)

Abstract

In this Paper, a low pressure water cold cup shape arc cathode has been investigated, which operates at arc current of 150A. The life time of the cathode at this current amounts to 100 hours and it is still capable of continuing the operation. The cathode has been successfully applied to an all-metal argon arc laser and anion plating equipment,