doi:10.3788/gzxb20124111.1383

阴极氧化对逸出功的影响

牟燕妮^{1a},叶萍²,张苏娟^{1a},陈泽学²,张炜³,陆治国^{1b}

(1 西北大学 a. 光子学与光子技术研究所; b. 物理学系, 西安 710069)

(2 西安飞行自动控制研究所,西安 710065)

(3 西安邮电大学 理学院,西安 710061)

摘 要:为了探索阴极的氧化程度对环形 He-Ne 激光器引燃特性的影响,利用光电减速场法研究 阴极材料的逸出功随阴极氧化的变化情况.在高真空条件下,用自制的卢基尔斯基球形光电测试平 台和平行电极光电-放电器件,通过实验测出了铝作为放电器件的冷阴极在氧化工艺处理前后的逸 出功及逸出功的值随氧化程度的变化情况.实验测得铝阴极在自然氧化后的逸出功为 2.60 ± 0.2 eV,此时被测铝阴极表面氧的质量百分比为 3.2%.经不同时间氧化工艺处理的铝阴极,其逸 出功随氧化时间的增长而降低.解释了铝阴极逸出功测量值可能处于 2.5~4.3 eV 之间的原因.由 实验结果得到在一定范围内,氧化时间越长,材料的逸出功越小,越有利于环形 He-Ne 激光器的点 燃.但阴极氧化也会影响气体放电过程的着火点压和阴极位降,因此对最佳氧化时间的选择要综合 考虑这两方面的因素.

关键词:铝阴极;氧化;逸出功;光电减速场法 中图分类号:O462.3 文献标识码:A

0 引言

对放电器件来说, 阴极的工作特性和寿命在很 大程度上决定了整个放电器件的工作特性、寿命以 及稳定性^[1-2]. He-Ne 激光器的常用阴极材料有铝、 铍、钼、锆、钛、镍等, 由于铝的低溅射, 低成本, 它成 为目前最常用的阴极材料. 影响环形 He-Ne 激光器 寿命的主要因素除了反射镜和管壳之间的密封性不 可靠之外, 还有阴极材料的耐轰击性等特性^[3]. 随着 加工工艺的不断改进和提高, 目前阴极材料的特性, 尤其是阴极材料的电子发射特性, 成为影响 He-Ne 激光器寿命的主要因素之一. 逸出功的大小直接表 征着阴极材料电子发射本领的高低. 因此对 He-Ne 激光器的阴极材料逸出功的研究有利于提高激光器 的寿命和稳定性.

目前,对铝阴极逸出功的研究主要集中在 20 世 纪 70~80 年代. 且这些研究主要针对纯铝材料,对 氧化铝的逸出功如何变化,并没有相关的报道. 前苏 联学者 В. И. Гапонов 的研究给出铝阴极的逸出功 为 4.2 eV^[4]. 英国的 R M Eastmen 等用 Fowler 实 验方法测出铝多晶结构的逸出功为 4.28±0.01 eV^[5]. 文章编号:1004-4213(2012)11-1383-4 挪威的 J. K. GREPSTAD 等用简化的 Fowler 法测 量出铝(100)、(111)和(110)晶面的逸出功分别为 4.41±0.03 eV、4.24±0.02 eV 和 4.28±0.02 eV^[6]. 有学者得出与前面各晶面对应的理论计算值为 4.20 eV、4.05 eV 和 3.65 eV^[7].中国大百科全书中 提供的光电效应法测得铝的逸出功为 2.5~3.6 eV^[8]. 由此可见对铝的逸出功的实验测量值与铝的纯度 (制备方式及贮存环境)、测试方法和测试条件有关. 为了方便实际测量和应用,本文采用自制的卢基尔 斯基球形光电测试平台和平行电极光电-放电器件, 用光电减速场法来测量实用铝阴极材料的逸出功, 并研究氧化程度对铝阴极逸出功的影响.

1 阴极逸出功的实验测量原理及方法

材料的逸出功是物质特性的主要参量之一,它 的大小直接表征着材料电子发射本领的高低.在确 定材料逸出功时,尽管有人用理论的方法进行计 算^[7],但更多的仍然是实验测定,主要实验方法有 Richardson 直线法、量热法、Fowler 等温法、接触电 位差法、场致发射法等^[9].因此阴极材料逸出功的实 验测量方法可以根据不同的实验条件来选择.对于熔

第一作者:牟燕妮(1988-),女,硕士研究生,主要研究方向为环形气体激光器及等离子体放电.Email:mynzhu1122@126.com

基金项目:航空科学基金(No. 20090898001)资助

导师(通讯作者):张苏娟(1975-),女,副研究员,主要研究方向为超快激光技术及其在生物医学方面的应用. Email: sujuan_zhang@ yahoo. com. cn

点较低的材料,如铝和铍就不适合用热电子发射的方法(如 Richardson 直线法等)来测量逸出功,而用光电 减速场法测量逸出功更为合适.文章采用了光电减速 场法对铝阴极的逸出功进行实验研究,实验所用的光 电测试系统为卢基尔斯基球形电极系统.

卢基尔斯基球形电极系统是用两个同心球作电极的系统,内球(半径为 r)作电子发射体,外球(半径为 r)作电子发射体,外球(半径为 R)内壁收集电子^[3].当r远小于R时,该方法测量电子总能量分布的精确度很高.若 $r/R\approx0.1$ 时,测到的电子能量分布的误差仅约为0.01.且对于以尺寸足够小的非球形电极代替内球的系统仍是正确的.利用光电减速场法测量发射到空间的自由电子的动能 K,它是电子吸收能量为 h_{ν} 的光子后克服了逸出功的剩余能量,因此由测得的 K 值就可求得逸出功,即 $\varphi=h_{\nu}-K$.

文章设计的卢基尔斯基球形电极系统的外球直径 16 cm, 阴极外径 2 cm, 引起的光电子能量分布误差为 1.6%.

实验中,光源用低压汞灯 253.7 nm 线,可测量 4.8 eV 以下材料的逸出功.为了在不多的分立谱线 中选取使用的谱线,选用型号 WGD-100 小型光栅 单色仪,焦距 100 mm.用卢基尔斯基法测量电子能 量分布,其难点在于微小电流的检测,实验中所用的 微电流计分辨率为 10⁻¹⁵ A,这是实验的核心仪器之 一.同时采用干式罗茨泵和涡轮分子泵组成的超高 真空系统,极限真空度应足以满足 10⁻⁵ Pa 的要求. 实验原理图如图 1.



图 1 逸出功测试实验原理装置图

Fig. 1 Experimental setup of measuring work function

测试系统共分四部分:1)光源,包括紫外灯 (253.7 nm)、单色仪;2)卢基尔斯基球;3)真空系 统,包括涡轮分子泵(Turbo Molecular Pump,TP)、 干式罗茨泵(Dry Roots Pump,RP)、超高真空计;4) 电路系统,包括 fA 级微电流计(A)、可调电源、电压 表(V).

2 逸出功的实验测量结果

被测阴极是纯度为 99.999%的铝加工而来,实

验过程中真空度保持在 10^{-5} Pa 量级. 实验测得的 伏安特性曲线如图 2.



对实验数据处理后,得到所测铝阴极的逸出功为2.60±0.2 eV,其中0.2 eV为t分布置信概率为0.95 时的综合误差.

该实验所测得铝的逸出功与文献资料所给出的 值相比偏小,与文献[8]中给出的光电发射法测量的 铝的逸出功 2.5~3.6 eV 相一致,本文对此作了如 下分析.

在测试前认为所测阴极是没有专门氧化的,但 由于铝在空气中极易氧化,在存放过程中已被氧化, 故阴极加工好之后再来测逸出功,其表面定会形成 一层自然氧化膜.为确定所测阴极的表面初始氧化 程度,对该阴极分析测试,结果表明被测铝阴极表面 氧的质量百分比为 3.2%.

3 阴极氧化对逸出功的影响

纯铝材料化学性能活泼,在空气中存放时表面 会被氧化.该氧化层坚固,保护内部铝材料不会继续 深度氧化,且在放电器件作为阴极使用时具有减小 阴极溅射,提高寿命的作用.所以,目前激光器常在 铝阴极表面镀一层氧化膜.为了研究氧化程度对材 料逸出功的影响,改用如图 3 所示的光电发射与放 电两用器件,对铝阴极不同时间氧化后测其逸出功, 该器件的电极结构考虑到消除边缘电场的影响.





氧化工艺:氧气气压133.3 Pa,氧化电流 0.131 mA,氧化时间10 min、30 min、60 min不等, 测得逸出功值如表1所示.

表 1 铝阴极不同氧化程度的逸出功

Table 1	Work	function	in	different	oxidation	degree
---------	------	----------	----	-----------	-----------	--------

Oxidation time/min	0	10	30	60
Measurements/eV	2.60	2.41	2.01	1.74

实验结果表明,在一定范围内,氧化时间越长, 材料的逸出功越小.由于测量装置是为研究氧化条 件对逸出功的影响而设计,电极系统对收集电子的 电场分布不够完善,所以测量准确度不高,但变化趋 势是明显的.如此低的逸出功值并没有发现可见光 照射阴极时呈现大的光电流,这可能是太厚的氧化 层阻碍了光子入射和光电子逸出阴极表面.在测试 阴极发射特性时发现过度氧化反而使正常辉光放电 的电流密度减小.

4 讨论

文献资料所给出的在超高真空制备的纯铝表面的逸出功值多在 4.1~4.3 eV 之间,而本文实验所测得铝的逸出功为 2.60±0.2 eV,分析可知主要有 三个影响因素.

1) 被测表面已非纯铝.由于铝在空气中极易氧 化,高纯铝在存放过程中事实上表面已被氧化,故所 测阴极表面形成一层自然氧化膜.氧原子的吸附通 常会降低(100)和(110)面的逸出功.(100)面暴露在 氧气中会使其逸出功降低 0.4~0.8 eV^[10].测试中 发现高纯铝中有微量碱金属,而异族元素的吸附会 增加表面电子的数量和能量,使逸出功下降^[11].由 此造成的表面逸出功的不均匀性也会使平均逸出功 值下降.

2)测量条件的影响.室温下蒸镀的铝膜有无序 性,会降低逸出功.蒸镀铝膜未经过退火处理,逸出 功也会降低.测量纯铝表面的逸出功通常要求真空 度要优于 10⁻⁷ Pa,达不到超高真条件下,由于吸附 水蒸气,会使铝的逸出功降低 1 eV^[12].此外,实验真 空度低于 10⁻⁵ Pa 时光电子同残余气体分子碰撞的 几率高,也会使测量的结果偏低.中国大百科全书给 出铝的逸出功值在 2.5~3.6 eV 之间,这大概是通 常铝在使用条件下的测量结果.在不同的环境条件 下需要知道铝的逸出功时,应该专门测试,无法使用 统一的理论值.

3)放电过程的影响.文献[12]认为单晶金属表面由于离子轰击引起的无序性会导致表面能量增加,使逸出功减小.这就是说放电过程也会引起逸出功降低.

5 结论

本文通过实验测量得到高纯铝在自然氧化条件 下的逸出功为 2.60±0.2 eV.对不同氧化程度的铝 阴极逸出功的测量,发现在一定范围内氧化时间越 长逸出功越低.这有利于环形 He-Ne 激光器的点 燃.但氧化时间过长会降低正常辉光放电的阴极发 射电流密度,提高放电的引燃电压,即阴极耐正离子 轰击能力反而降低.这部分内容将在后续研究中作 详细讨论.本研究对改善环形 He-Ne 激光器的引燃 特性和提高其寿命具有指导意义.

参考文献

- [1] HE Xiao-qing, ZHANG Zhen-hui, GAO Ai-hua, et al. Experimental investigation on the gain characteristics of laser gyro[J]. Acta Photonica Sinica, 2011, 40(3): 371-372.
 何小庆,张振辉,高爱华,等.激光陀螺增益特性的实验研究 [J]. 光子学报, 2011, 40(3): 371-372.
- [2] SU Bin, GAO Ai-hua, ZHANG Wei, et al. Power stability research on 3 391 nm He-Ne laser[J]. Acta Photonica Sinica, 2008,37(2): 216-218.
 苏斌,高爱华,张炜,等. 3 391 nm He-Ne 激光器稳定性研究 [J],光子学报,2008,37(2):216-218.
- [3] TAN Zhi-fei, ZOU Zhi-jie, LIU Jin-shou. Investigation on the aluminum cathode service life of He-Ne laser [J]. Laser and Infrared, 1980, 1(12): 2.
 谭志飞,邹志洁,刘金绶. He-Ne 激光管长寿命铝阴极的研究 [J]. 激光与红外, 1980, 1(12): 2.
- [4] ΓΑΠΟΗΟΒ Β. И. Electronics[M]. LOU Ge, transl. Beijing: Higher Education Press, 1965.
 ΓΑΠΟΗΟΒ Β. И. 电子学[M]. 楼格,译. 北京:高等教育出版 社,1965.
- [5] EASTMENT R M, MEE C H B. Work function measurement on (100),(110) and (111) surface of aluminum[J]. J Phys F: Metal Phys, 1973, 3(9): 1738-1745.
- [6] GREPSTAD J K, GARTLAND P O, SLAGSVOLD B T. Anisotropic work function of clean and smooth low-index face of aluminum[J]. Surface Science, 1976, 2(57): 348-362.
- [7] LANG N D, KOHN W. Theory of metal surfaces: work function[J], Physical Review B, 1971, 3(4): 1215-1223.
- [8] 鲍家善.中国大百科全书-物理卷一[M].北京:中国大百科全 书出版社,1985:638.
- [9] YANG De-qing, CHEN Er-gang. A new measurement of the material work function[J]. Acta Physica Sinica, 1988, 37 (12): 20-22.
 杨德清,陈尔纲. 测定材料逸出功的一种新方法[J]. 物理学报, 1988, 37(12): 20-22.
- BERGE S, GARTLAND P O, SLAGSVOLD B J. Photoelectric work function of a molybdenum single crystal for the (100), (110), (111), (112), (114), and (332) faces
 [J]. Surface Science, 1974, 43(1): 275-292.
- [11] ZHANG En-qiu. Some properties of the work function[J]. Journal of Electronics, 1989, 11(3): 244-249.
 张恩虬.逸出功的某些特性[J].电子科学学刊, 1989, 11 (3): 244-249.
- [12] FORT T, WELLS R L. Adsorption of water on clean aluminum by measurement of work function changes [J]. Surface Science, 1972, 32(3): 543-553.

Influence of Aluminum Cathode Oxidation on Work Function

MU Yan-ni^{1a}, YE Ping², ZHANG Su-juan^{1a}, CHEN Ze-xue², ZHANG Wei³, LU Zhi-guo^{1b}

(1 a. Institute of Photonics and Photon-Technology; b. Department of Physics,

Northwest University, Xi'an 710069, China)

(2 Xi'an Flight Automatic Control Research Institute, Xi'an 710065, China)

(3 School of Science, Xi'an University of Posts and Telecommunications, Xi'an 710061, China)

Abstract: To explore how the degree of cathode oxidation influences the ignites characteristics of ring He-Ne laser, photoelectric retarding potential method is used to investigate the variation of the work function with the cathode oxidation. As the cold cathode of discharge device, aluminum's work function and the work function variation before and after oxidation are measured under the high vacuum conditions by $\Pi y_{K} \mu_{P} \kappa_{K} \mu \pi$ spherical photo electronic measure equipment and parallel electrodes optic-electronic & discharge device. The experimental results show that work function of aluminum cathode in the natural oxidation is 2. 60 ± 0.2 eV. The mass percent of oxygen on aluminum cathode surface is 3.2%. At different times of oxidation process, the work function measurements of aluminum cathode may be in $2.5 \sim 4.3$ eV are explained. The conclusion from the experimental results is the oxidation time is longer, the smaller the work function of the material, the more conducive to the ignition of the ring He-Ne laser within a certain range. Cathode oxidation also affect the ignition voltage and the cathode potential drop of gas discharge process . So the choice of the optimal oxidation time ought to consider these two factors.

Key words: Aluminum cathode; Oxidation; Work function; Photoelectric retarding potential method