

## 防离子反馈膜粒子阻透率随环境温度变化的模拟研究

付申成<sup>1,2</sup>, 李 野<sup>2</sup>, 端木庆铎<sup>2</sup>, 桑文玲<sup>2</sup>, 孙 擘<sup>2</sup>

- (1. 微光夜视技术重点实验室, 陕西 西安 710065;
2. 长春理工大学 理学院, 吉林 长春 130022)

**摘 要:** 覆有防离子反馈膜的微通道板是第三代微光像增强器的核心部件之一。真空高温烘烤除气过程对防离子反馈膜粒子阻透特性会产生破坏性的影响。文中利用分子动力学方法模拟计算并得到  $\text{Al}_2\text{O}_3$  薄膜的膜层密度随环境温度的变化规律。利用蒙特卡洛方法模拟计算了  $\text{Al}_2\text{O}_3$  薄膜的电子透过率和离子阻挡率随入射粒子能量的变化曲线。得到  $\text{Al}_2\text{O}_3$  薄膜的死电压在 235 V 左右, 同时得出防离子反馈膜离子阻挡率在入射离子能量降低后有所增加。在入射离子能量降低为 250 eV 时, C、N、O 离子被  $\text{Al}_2\text{O}_3$  薄膜阻挡的比率高达 96%–99%。综合以上因素分析得出, 随着外部温度的升高, 电子透过率线性增加, 而离子阻挡率非线性的下降。合理优化并调整高温烘烤时间和量值将有助于防离子反馈膜工作性能的改善。

**关键词:** 防离子反馈膜; 电子透过率; 离子阻挡率; 环境温度

**中图分类号:** O463 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)01-0129-04

## Simulations on the particle blocking and transmitting performance of ion barrier film versus environmental temperature

Fu Shencheng<sup>1,2</sup>, Li Ye<sup>2</sup>, Duanmu Qingduo<sup>2</sup>, Sang Wenling<sup>2</sup>, Sun Bo<sup>2</sup>

- (1. Science and Technology on Low-Light-Level Night Vision Laboratory, Xi'an 710065, China;
2. School of Science, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

**Abstract:** Microchannel Plate (MCP) with ion barrier films (IBFs) is one of the key components in Low Light Level (LLL) Image Intensifier ( $I^2$ ) tubes in Generation III. Vacuum high-temperature baking process plays a destructive role in the particle blocking and transmitting performance of ion barrier film.  $\text{Al}_2\text{O}_3$  thin film density as a function of the temperature of the environment was studied using molecular dynamics simulation. Electron transmittance and ion barrier blocking ratio of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  thin film versus the energy of incident particles were simulated and calculated using the Monte Carlo method. The dead voltage of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  thin films was about 235 V, and with the decrease of the incident ion energy, ion blocking ratio increased. When the incident energy was 250 eV, the preventing ability of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  films on C, N, O ions was 96%–99%. Based on the above factors analysis, with the increase of the external temperature, electron transmittance increased linearly, while the blocking ratio of ion barrier decreased

收稿日期: 2013-05-08; 修订日期: 2013-06-14

基金项目: 国家自然科学基金(61077024, 61007006)

作者简介: 付申成(1979-), 男, 副教授, 博士, 主要从事光电成像器件与技术和光致变色光存储材料与技术的研究工作。

Email: fusc515@163.com

nonlinearly. Optimization and adjustment of high temperature baking time and quantity will contribute to the ion barrier film performance improvement.

**Key words:** ion barrier film; electron transmittance; ion blocking ratio; environmental temperature

## 0 引言

在第三代微光像增强器中,覆有防离子反馈膜的微通道板(MCP)是其重要部件。像管正常工作期间,来自于光电阴极的光电子在前近贴区加速电场作用下入射到MCP的微孔通道内,与通道内壁碰撞后产生了大量的二次电子,最终在MCP孔道的输出端会产生密度极高的电子云。在目前的真空工艺下,由于吸附作用很难将残余的气体分子彻底清除。这样高密度电子云在后近贴区高强度电场作用下与气体分子相互作用,使其电离,形成了大量的正离子。这部分正离子在加载于通道两端的电场作用下反向加速。在其运动过程中既可能与通道内壁相碰产生二次电子,又可能离化剩余的气体分子,甚至可能逸出微孔通道轰击光电阴极。当光电阴极受到轰击后,其表面形貌会有所改变,这样会降低它的使用寿命;同时会诱导新的光电子产生并且倍增,在荧光屏上产生噪点,直接影响到图像的对比度和信噪比。针对以上诸多问题,目前广泛采用的办法是在MCP的输入面上附着一层厚度很小的介质薄膜。它具有“半反半透”的特点,在一定程度上,既允许质量很小且具有一定能量的电子通过,又禁止质量较大的离子穿越该薄层,进而避免其破坏硫化镓光阴极和铯氧激活层,有效地提高了像管的使用寿命,为器件的实用化提供了保证<sup>[1-5]</sup>。

对于MCP而言,真空环境是必备条件。通常利用真空高温烘烤的办法来去除MCP内的残余气体,因而防离子反馈膜的结构会受到环境温度变化的影响,粒子阻透特性会发生明显的变化,为此通过计算机模拟方法来研究环境温度改变下,膜层物理参数的稳定性是具有实际意义的,对研发高性能微光器件也具有重要的指导作用。文中利用分子动力学方法和蒙特卡洛模拟方法对氧化铝防离子反馈膜电子透过率和离子阻挡率的温度依赖特性进行了系统研究,为制备超薄高效防离子反馈膜提供了理论依据。

## 1 防离子反馈膜膜层密度与环境温度之间的关系

对于氧化铝防离子反馈膜,选择由 $N$ 个粒子组成的分子动力学元胞,选取周期性边界条件,给定铝-铝、铝-氧和氧-氧原子间的势函数,研究该二体问题下的薄膜体积随环境温度的变化规律,即可间接获得膜层密度的温度依赖特性。图1为防离子反馈膜的膜层密度随环境温度变化的模拟结果。

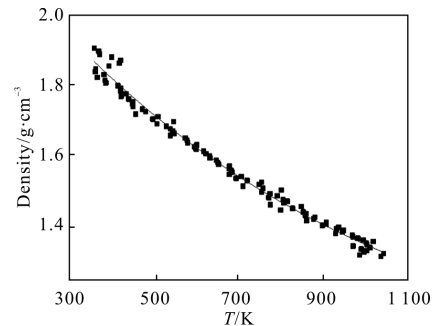


图1 防离子反馈膜的膜层密度的环境温度依赖特性

Fig.1 Dependence of ion barrier film density on environmental temperature

可以看出,膜层密度随着环境温度的升高而近乎线性的下降。室温下,氧化铝的膜层密度约为 $1.9 \text{ g/cm}^3$ ,当温度升高至 $1000 \text{ K}$ 时,氧化铝薄膜内部原子间相互作用力明显减弱,原子间距变大,膜层密度降至 $1.3 \text{ g/cm}^3$ 。

## 2 防离子反馈膜电子透过特性模拟

入射电子束进入到 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 膜层中后,少数电子直接穿越膜层,大部分电子将与膜层中的原子碰撞,发生散射现象。依据散射过程中入射电子能量的损失程度可以将电子在膜层中的散射分为:弹性散射与非弹性散射。入射电子束经过防离子反馈膜后,电子个数、空间分布和电子的能量均有所改变。通常利用“死电压”来描述防离子反馈膜对入射电子穿过膜层的影响程度。其物理本质在于电子能否穿越膜层的临界加速电压的数值<sup>[6-9]</sup>。下面利用蒙特卡洛方法,

对电子透过膜层的能力进行了研究。模拟条件为:输入电子个数 100000 个;电子能量从 0 变化到 800eV;电子入射角为 5°;防离子反馈膜厚为 5 nm;膜层密度分别为室温下的 1.90 g/cm<sup>3</sup>。

表 1 给出了对于条件确定的防离子反馈膜在不同的加速电压下电子透过率的变化情况。当入射电子能量小于等于 230 eV 时,没有电子能够穿越膜层。而当电子能量在此基础上增加 10 eV 后,即出现了电子透过膜层的现象。在进一步增加达到 250 eV 后,透过率从 0.452% 变到 1.714%,增加了近 4 倍。而后,入射电子透过的比率会随着电子获取能量的进一步增加而快速上升。综合分析电子穿越膜层临界条件下的模拟结果可以得出,对于 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 防离子反馈膜,在膜层厚度为 5 nm 时的“死电压”为 235 V 左右。细化模拟结果,电子入射能量从 0 增加至 800 eV 的整个过程中,电子透过率的变化类似于一个标准的指数增长过程,如图 2 所示。230~400 eV 区域为线性区,400 eV 以后为过渡区和饱和区。

表 1 防离子反馈膜电子透过率的电压依赖特性

Tab.1 Electron transmittance of ion barrier film versus operation voltage

Operation voltage /eV	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> electron transmittance
220	0
230	0
240	0.452%
250	1.714%

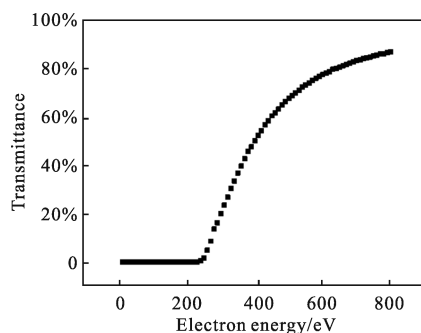


图 2 5 nm Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 防离子反馈膜电子透过率随电压变化的模拟曲线

Fig.2 Simulation curve of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ion barrier film of 5 nm electron transmittance versus voltage

基于以上的实验结果,电子穿越膜层的临界加速电压是模拟过程中的重要参考点,在该点之前的

区域,电子不可通过膜层,在该点之后的区域,入射电子的透过率随加速电压急剧增加。根据上述蒙特卡洛模拟结果,笔者进一步结合分子动力学方法模拟计算了在入射电子能量恒定(600 eV)时,环境温度改变后,电子透过率随之变化的情况,如图 3 所示。可以看出,防离子反馈膜电子透过率随环境温度的升高而线性增大,由室温下的 76.5% 增加到 1000 K 下的 85.9%。

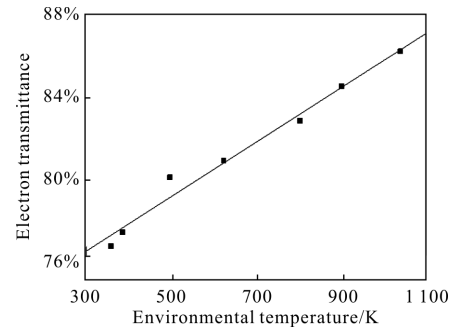


图 3 电子透过率随环境温度变化图

Fig.3 Simulation curve of electron transmittance as a function of environmental temperature

### 3 防离子反馈膜离子阻挡能力模拟

在 MCP 中的残余气体分子主要元素成分包含有 H、C、N 和 O。因而上述 4 类原子被高能电子轰击后,均可能变为+1 价态的离子。利用蒙特卡洛方法,对防离子反馈膜的离子阻挡能力进行模拟研究。模拟条件为:H、C、N、O 4 种正离子各为 99 999 个;离子能量从 0 变化到 500 eV 时;离子入射角为 0°;膜层厚度为 5 nm;膜层密度分别为 1.90g/cm<sup>3</sup> Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 防离子反馈膜。氧化铝防离子反馈膜离子阻挡率随入射能量的变化情况如图 4 所示。

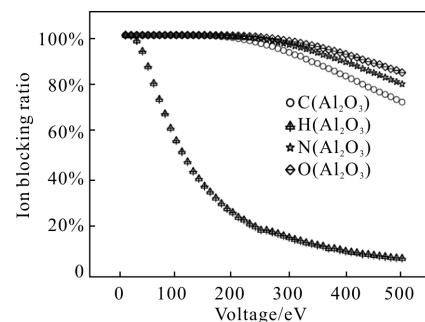


图 4 室温下 5 nm Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 防离子反馈膜对 H、C、N、O 离子阻挡率的电压依赖特性

Fig.4 Dependence of ion blocking ratio of ion barrier film on voltage for H, C, N, O

可见  $\text{Al}_2\text{O}_3$  防离子反馈膜对 C、N、O 离子有很好的阻挡作用,对 H 离子的阻挡作用不理想。离子阻挡率与离子质量密切相关,质量越轻的离子, $\text{Al}_2\text{O}_3$  防离子反馈膜对其进行阻挡的能力越弱。

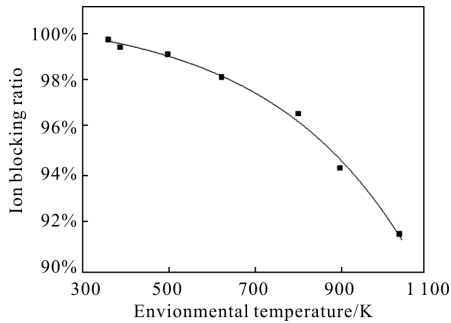


图 5 离子阻挡率随环境温度变化图

Fig.5 Simulation curve of ion blocking ratio versus environmental temperature

根据上述模拟结果,进一步模拟计算了在入射 N 离子能量恒定(200 eV)时,离子透过率的环境温度依赖特性,如图 5 所示。可以看出,防离子反馈膜离子阻挡率随环境温度的升高而非线性降低,由室温下的 99.5%降低到 1 000 K 下的 91.2%。可见,高温烘烤过程虽然改善了微光器件的真空环境,但同时也弱化了它的离子壁垒作用。平衡二者之间的关系既要调整烘烤时间,又要降低烘烤温度。

## 4 结 论

文中利用分子动力学方法模拟计算并得到了  $\text{Al}_2\text{O}_3$  薄膜的膜层密度随环境温度近乎线性的变化规律。利用蒙特卡洛方法模拟计算了  $\text{Al}_2\text{O}_3$  薄膜的电子透过率和离子阻挡率随入射粒子能量的变化曲线。 $\text{Al}_2\text{O}_3$  薄膜的死电压在 235 V 左右。随着入射离子能量的升高,离子阻挡率逐渐降低。当入射能量为 260 eV 时, $\text{Al}_2\text{O}_3$  薄膜对 C、N、O 离子的阻止能力高达 95%–99%。随着外部温度的升高,电子透过率线

性增加,而离子阻挡率非线性地下降。综合分析得出:合理调整并优化高温烘烤时间和量值将有助于防离子反馈膜工作性能的改善。

## 参 考 文 献:

- [1] Pollehn H K. Performance and reliability of third-generation image intensifiers [J]. *AEEP*, 1985, 64A: 61–67.
  - [2] Roaux E, Richard J C, Piaget C. Third generation image intensifier [J]. *AEEP*, 1985, 64A: 71–75.
  - [3] Feldman L C, Mager J W. Fundamentals of surface and thin film analysis [M]. Amsterdam: Elsevier, 1986: 236–238.
  - [4] Ashley J C, Tung J C, Ritchie R H. Inelastic interactions of electrons with polystyrene: calculations of mean free paths, stopping powers, and CSDA ranges [J]. *IEEE Trans Nucl Sci*, 1978, NS-26: 1566–1571.
  - [5] Ashley J C, Tung C J, Ritchie R H, et al. Calculations of mean free paths and stopping powers of low energy electrons (< 10 keV) in solids using a statistical model [J]. *IEEE Trans Nucl Sci*, 1976, NS-23: 1833–1834.
  - [6] Seah M P, Dench W A. Quantitative electron spectroscopy of surfaces: a standard data base for electron inelastic mean free paths in solids [J]. *Surf Interface Anal*, 1979, 1: 2–5.
  - [7] Smirnov B N, Gavallas L A. Role of the secondary electrons of a transmission film in the output current of microchannel plates [J]. *Sov J Opt Technol*, 1986, 53(12): 730–732.
  - [8] Inokuti M, Itikawa Y, Turner J E. Inelastic collisions of fast charged particles with atoms and molecules—the bethe theory revisited [J]. *Review of Modern Physics*, 1978, 50(1): 23–35.
  - [9] Wang Yi, Yang Pingli, Zhu Weijie, et al. Study of parallel computing of a Monte Carlo programs [J]. *Nuclear Electronics & Detection Technology*, 2001, 21 (1): 31–33. (in Chinese)
- 王义, 杨平利, 朱伟杰, 等. 蒙特卡罗程序并行计算研究 [J]. 核电子学与探测技术, 2001, 21(1): 31–33.