材料、结构及工艺

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2023011702

微通道板 BeO 防离子反馈膜粒子阻透率的模拟研究

鲁蓝霜，王国政*，夏　加，张益博，杨继凯

（长春理工大学 物理学院，长春 130022）

摘　要： 带有防离子反馈膜的微通道板是第三代微光像增强器件中的核心部件。文章阐述了防离子反馈膜的电子透过、离子阻止特性，利用 Monte-Carlo 模拟方法计算了氧化铍和三氧化二铝防离子反馈膜电子透过率和离子阻止率在不同条件下的变化曲线。模拟结果表明，氧化铍薄膜比三氧化二铝薄膜的电子透过特性好，而三氧化二铝薄膜比氧化铍薄膜的离子阻止本领好，证实了氧化铍作为防离子反馈膜的可行性。

关键词： 防离子反馈膜；蒙特卡罗模拟；电子透过率；离子阻止率

中图分类号： O463　**文章编号：** 1001－5868(2023)03－0400－04

Simulations on the Particle Blocking and Transmitting Performance of Microchannel Plate BeO Ion Barrier Film

LU Lanshuang, WANG Guozheng, XIA Jia, ZHANG Yibo, YANG Jikai

(School of Physics, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, CHN)

Abstract: Microchannel plate (MCP) with ion barrier films is the core component in Low Light Level (LLL) Image Intensifier tubes in Generation Ⅲ. In this paper, the electron transmittance and ion blocking properties of IBFs were described. Monte-Carlo simulation method was used to calculate the electron transmittance and ion blocking ratio of BeO and Al_2O_3 under different conditions. The simulation results show that BeO IBFs has better electron transmittance than Al_2O_3 IBFs, while Al_2O_3 IBFs has better inferior ion blocking ability than BeO IBFs. It is proved that BeO is feasible as an ion barrier film.

Key words: ion barrier film; Monte-Carlo simulation; electron transmittance ratio; ion blocking ratio

0　引言

微通道板(MCP)是第三代微光像增强器件中的核心部件[1]。当三代微光像增强器在极高真空状态下工作时，由光电阴极产生的光电子在加速电场作用下入射到 MCP 的通道内，与通道内壁发生碰撞，经过多次倍增后产生大量的二次电子，在 MCP 的输出端会形成高密度的电子云[2]。由于真空工艺的限制及气体分子的吸附作用等原因，像管中必然存在残余的气体分子难以彻底被清除，它们电离形成的正离子在电场作用下反向撞击通道内壁或光电阴极。此时，光电阴极因受到轰击，表面形貌发生改变而造成不可逆的损伤，使 MCP 的线性工作特性受到破坏，并影响光电阴极寿命。同时，产生新的光电子发射在荧光屏上形成离子斑，直接降低了图像质量。这就是离子反馈带来的危害[3]。减少离子反馈的一种有效方法是在 MCP 的输入面上覆盖一层超薄膜。该膜可透过质量小且具有能量的电子，并有效阻止正离子穿透膜层破坏光电阴极，延长像管的工作寿命，通常称这种薄膜为防离子反馈膜或者离子壁垒膜[4-5]。

目前防离子反馈膜的材料常为Al_2O_3，尽管它

收稿日期：2023－01－17.

* 通信作者：王国政　E-mail：wguozheng@163.com

对离子反馈能起到一定作用，但也会损失部分入射电子能量，导致微通道板增益有所下降。为了提高三代微通道板性能，需要选择一种电子透过能力、离子阻止本领优越的薄膜材料。针对防离子反馈膜阻透特性，本文对 BeO 作为防离子反馈膜材料的可行性进行了研究。阐述了薄膜的电子透过特性、对正离子的阻止本领，利用 Monte-Carlo 模拟方法对 Al_2O_3，BeO 防离子反馈膜的电子透过率、离子阻止率进行了模拟计算和比较，为制备高效防离子反馈膜提供理论依据。

1　薄膜的粒子阻透特性的 Monte-Carlo 模拟

Monte-Carlo 方法是一种统计模拟方法。该方法利用现代计算机强大的计算性能，以被研究对象所遵循的物理规律为依据，使用枚举生成大量随机事例；通过对这些事例进行统计分析，可以解决一些解析法难以求解甚至不可能求解的问题。其本质上是利用计算机生成符合不同要求或分布的随机数：根据生产生活的不同需求，这些随机数往往服从某种特定的概率分布[6]。在大量的随机采样数据事例支持的情况下，就可以进行统计学上的研究，进而解决一些难以通过常规理论计算处理的问题。根据大数定律，足够多的事例会让结果无限趋近于期望值。本文利用 Monte-Carlo 方法对 Al_2O_3 和 BeO 防离子反馈膜的阻透特性进行模拟分析。

对于薄膜中电子透过的模拟涉及两个计算方面：第一个是样品内部电子轨迹的几何计算或射线追踪；第二个方面是与样品内部物质的物理相互作用。两者都是成功模拟电子轨迹所必需的。本文选择 CASINO 软件模拟电子入射进防离子反馈膜的运动轨迹，可以计算出每个电子散射的位置、角度和能量，导出为文本文件以供手动处理[7]。

对于薄膜的离子阻止本领的模拟，主要是计算离子在固体中受到阻止及射程。同时作三个假定：薄膜为非晶结构，原子排列无序；入射离子与薄膜中单个原子相互作用是两体碰撞问题，忽略周围原子的影响；核阻止和电子阻止是两个独立过程。本文选择 SRIM 软件模拟跟踪入射离子在三维空间的运动，该软件通过对不同参数（离子种类、离子能量、材料和入射角）下的离子入射过程进行模拟，获得离子位置、能量损失以及次级离子的各种参数，实现对离子射程、反冲原子分布等参数的精确计算。同时这些参数将在整个跟踪过程中被存储下来，最后得到各种所需物理量的值[8-9]。

2　薄膜的电子透过特性模拟

在三代微光像增强器中，入射电子束进入防离子反馈膜的过程实际上就是电子与固体相互作用的过程。少数电子可以直接穿过防离子反馈膜，大部分电子会与薄膜的原子发生碰撞，发生散射现象。根据散射过程中入射电子能量的损失程度，可以分为弹性散射电子和非弹性散射电子。同时，因为电子与防离子反馈膜材料相互作用，电子的个数、能量和空间分布均产生变化。通常用“死电压”来描述防离子反馈膜对电子透过薄膜的影响程度，其物理本质是电子刚好穿透薄膜时能量损失的阈值。

接下来，对防离子反馈膜电子透过特性进行模拟。模拟条件为：防离子反馈膜膜层厚度为 5 nm；入射电子数目为 10 000 个，入射电子能量在 0～1 000 eV 范围内。将模拟数据导出得到防离子反馈膜的电子透过率（透过电子数与入射电子数之比）。表 1 给出了固定条件下两种薄膜在不同电子能量下电子透过率的变化情况。图 1 所示为电子透过率与入射电子能量的关系。

表 1　入射电子能量对死电压的影响

电子能量/eV	Al_2O_3 薄膜电子透过率/%	BeO 薄膜电子透过率/%
230	0	0
240	0	0.007
250	0.594 1	0.774 7
260	1.082 7	1.688
270	3.107 9	4.349 8

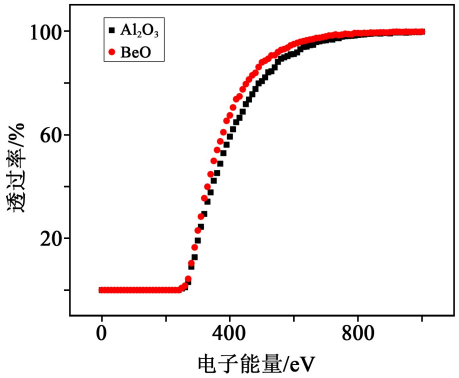


图 1　不同能量电子透过率模拟结果

根据模拟结果可知，当入射电子能量小于 230 eV 时，没有电子能够穿透薄膜。在此基础上增加 10 eV 后，少量电子穿透了 BeO 薄膜，但是没有电子透过 Al_2O_3 薄膜；进一步增加电子能量至 260 eV 时，电

子透过率从 0.594 1%，0.774 7%达到 1.082 7%，1.688%。随着电子能量的增加，电子透过的比率急速上升。综合分析两种薄膜对电子穿过膜层的临界值可知，在该模拟条件下，Al_2O_3 薄膜的“死电压”出现在 245 V 左右；BeO 薄膜的“死电压”出现在 240 V 左右。当电子能量大于死电压时，电子透过薄膜的概率将迅速增大。观察图 1 中细化的模拟结果，入射电子能量在 0 增加至 1 000 eV 的过程中，电子透过率呈指数增长，230～430 eV 为线性区，430 eV 后为过渡区和饱和区。BeO 薄膜的电子透过率整体上略高于 Al_2O_3 薄膜，只有在两者电子透过率达到饱和时，两种曲线才趋于重合。模拟结果表明了，随着入射电子能量越高或者膜层密度越低，薄膜的电子透过率越高。

3 薄膜的离子阻止特性模拟

当正离子进入防离子反馈膜后，离子会与薄膜原子核及周围电子发生碰撞而损失能量，则单位长度的能量损失主要由这两种过程引起，分别叫做核阻止和电子阻止。设离子在薄膜中射程的一个微段 dR 上，与薄膜核及电子发生碰撞而失去的能量分别为 $-dE_n$ 和 $-dE_e$，则损失的总能量为：

$$-dE = N dR[S_n(E) + S_e(E)] \quad (1)$$

式中，N 为薄膜材料的原子密度，E 为离子在 dR 处的能量，$S_n(E)$ 和 $S_e(E)$ 分别表示薄膜中原子核和电子对入射离子阻止本领的大小。

Lindhard 等[10] 选用 Thomas-Fermi 势对核阻止本领进行了详细的计算，由他们提出的低速度重离子在非晶靶中的射程分布理论被称为 LSS 理论。利用该理论算得的核阻止本领如图 2。

如图 2 所示，随离子能量增加核阻止本领开始增加，在 $\varepsilon' = 0.3$ 附近达到极大值，然后逐渐减小。因此，入射离子进入薄膜中，当能量较高时，薄膜材料原子核的阻止作用并不明显，而当离子能量逐渐减小时，核的阻止作用随之增大。在低能区，也就是 ε' 以下的区域，离子和原子核的碰撞成为能量损失的主要因素，核阻止本领占主要地位。

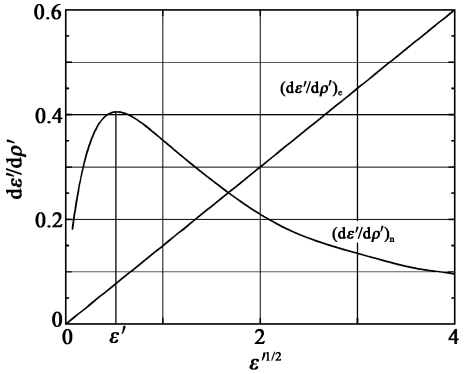


图 2 理论上的核阻止和电子阻止本领曲线

3.1 离子阻止本领模拟

在 MCP 中的残余气体分子主要元素包含 H，C，N 和 O，上述原子被高能电子轰击后，均可能变为+1 价态的离子。利用 SRIM 软件对 Al_2O_3，BeO 两种薄膜的阻止本领进行 Monte-Carlo 模拟分析，模拟条件为：防离子反馈膜膜层厚度为 5 nm；H，C，N 和 O 正离子数量各 10 000 个，入射离子能量在 0～600 eV 范围内。表 2，3 给出了固定条件下两种膜层对 O 离子的电子阻止本领、核阻止本领和投影射程，可以估计入射离子在非晶防离子反馈膜的平均穿透深度。图 3 给出了相同条件下不同离子在防离子反馈膜中的投影射程。

表 2 Al_2O_3 对 O 离子的阻止本领

离子能量/eV	电子阻止 $\left[\frac{dE}{dZ}\right]_e$/(eV/nm)	核阻止 $\left[\frac{dE}{dZ}\right]_n$/(eV/nm)	投影射程/nm
100	0.080	0.548	1.2
300	0.139	0.888	2.4
500	0.180	1.000	3.4

表 3 BeO 对 O 离子的阻止本领

离子能量/eV	电子阻止 $\left[\frac{dE}{dZ}\right]_e$/(eV/nm)	核阻止 $\left[\frac{dE}{dZ}\right]_n$/(eV/nm)	投影射程/nm
100	0.067	0.631	1.3
300	0.116	0.794	2.6
500	0.150	0.908	3.7

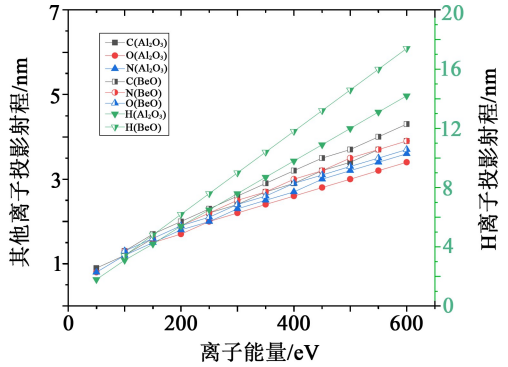


图 3 不同离子在防离子反馈膜中的投影射程模拟结果

根据表 2，3 可知，防离子反馈膜对离子的阻止作用，一般用核阻止本领和电子阻止本领两个物理量来描述。在该条件下核阻止本领比电子阻止本领更加显著，能量为 500 eV 的 O 离子可以被 3.4 nm 厚的 Al_2O_3 薄膜、3.7 nm 厚的 BeO 薄膜阻止。图 3 表明入射离子原子序数越大其投影射程越短。

Al_2O_3 薄膜的离子阻止本领比 BeO 薄膜略强，相同条件下，离子在 Al_2O_3 薄膜中射程更短。此结果与前面所述 LSS 理论一致。

3.2　离子阻止率模拟

利用 SRIM 模拟两种薄膜离子阻止率（透过离子数与入射离子数之比）。模拟条件为：防离子反馈膜膜层厚度为 5 nm；H，C，N 和 O 正离子数量各 10 000 个，入射离子能量在 0～500 eV 范围内。图 4 给出了相同条件下不同能量离子入射 5 nm 厚防离子反馈膜离子阻止率的模拟结果。

由图 4 可见，两种薄膜对 C，N，O 离子有较好的阻止作用，对 H 离子的阻止作用较差。且离子阻止率与离子质量密切相关，对于原子序数越小的离子，防离子反馈膜的阻止能力越弱。Al_2O_3 薄膜的离子阻止率比 BeO 薄膜的略高，随着离子入射能量的增长，Al_2O_3，BeO 两种薄膜的离子阻止率均逐渐下滑。当入射能量为 200～300 eV 时，Al_2O_3 在该条件下的的阻止率高达 92.8%～99%。而 BeO 薄膜对 C，N 和 O 离子的阻止率为 92.4%～98.9%，证明 BeO 也是理想的防离子反馈膜材料。

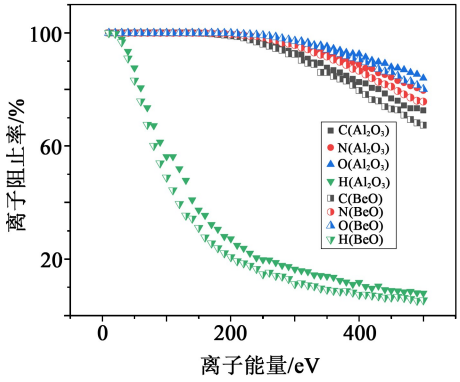


图 4　不同能量离子入射 5 nm 厚薄膜模拟结果

4　结论

本文利用 Monte-Carlo 模拟计算方法，使用 CASINO 与 SRIM 模拟软件，对 Al_2O_3，BeO 两种薄膜材料的电子透过特性和离子阻止本领进行了模拟计算，得到了阻透特性随入射粒子能量的变化曲线。从薄膜的电子透过特性模拟结果表明：在相同条件下，Al_2O_3 薄膜的死电压在 245 V 左右，BeO 薄膜死电压在 240 V 左右；BeO 薄膜的电子透过能力比 Al_2O_3 薄膜的略高。薄膜对离子阻止的模拟结果表明：离子在低能区所受核阻止本领比电子阻止本领大；随着入射离子能量的增加，离子阻止率逐渐减小。虽然 BeO 薄膜离子阻止能力略弱于 Al_2O_3 薄膜，但是当入射离子能量在 300 eV 时，两种薄膜对 C，N 和 O 的阻止能力都在 92%以上。综合考虑，BeO 也是制备防离子反馈膜的理想材料。

参考文献：

[1] 向世明，倪国强. 光电子成像器件原理[M]. 北京：国防工业出版社，1999：177-191.
Xiang Shiming，Ni Guoqiang. The Principle of Photoelectric Imaging Devices[M]. Beijing：National Defence Press，1999：177-191.

[2] 王立峰. 微通道板防离子反馈膜及其对像管成像性能影响的研究[D]. 长春：长春理工大学，2005：9.
Wang Lifeng. MCP ion barrier film and its influence on the image quality of image tube[D]. Changchun：Changchun University of Science and Technology，2005：9.

[3] 邹异松. 电真空成像器件及理论分析[M]. 北京：国防工业出版社，1989：74-77.
Zou Yisong. Electrical Vacuum Imaging Devices and Theoretical Analysis[M]. Beijing：National Defence Press，1989：74-77.

[4] 张太民，石　峰，朱宇峰. 电子束蒸镀 MCP 超薄防离子反馈膜及膜层特性分析[J]. 应用光学，2012，33(6)：1113-1117.
Zhang Taimin，Shi Feng，Zhu Yufeng. Preparation of ion barrier film of MCP with e-beam evaporation and its properties analysis[J]. Appl. Opt.，2012，33(6)：1113-1117.

[5] 姜德龙，刘庆飞，李　野. 微通道板离子壁垒膜及其对入射离子的阻止作用[J]. 发光学报，2006(6)：1015-1020.
Jiang Delong，Liu Qingfei，Li Ye. MCP ion barrier film and its stopping function on incident ions[J]. Chinese J. of Luminescence，2006(6)：1015-1020.

[6] Raychaudhuri S. Introduction to Monte Carlo simulation[C]// Proc. of the 2008 Winter Simulation Conference，2008：91-100.

[7] Demers H，Poirier-Demers N，Couture A R，et al. Three-dimensional electron microscopy simulation with the CASINO Monte Carlo software[J]. Scanning，2011，33(3)：135-146.

[8] Biersack J P，Ziegler J F. The Stopping and Range of Ions in Solids[M]. Ion Implantation Techniques，1982，10：122-156.

[9] Littmark U，Ziegler J F. Ranges of energetic ions in matter[J]. Phys. Rev. A，1981，23(1)：64-72.

[10] Lindhard J，Scharff M，Schiøtt H E. Range Concepts and Heavy Ion Ranges[M]. Copenhagen：Munksgaard，1963.

作者简介：

鲁蓝霜(1996—)，女，吉林省松原市人，硕士研究生，研究方向为光电薄膜材料与成像器件；

王国政(1977—)，男，吉林省舒兰市人，博士，硕士生导师，研究方向为光电薄膜材料与成像器件。