

近贴型像增强器中微通道板输入端电场模拟研究

宋 德^{1,2}, 朴 雪², 拜晓锋¹, 刘春阳²

(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: 微通道板输入端的电场分布影响光生电子的运动轨迹和近贴型像增强器的性能。由于微通道板内大量的微通道孔使微通道板和光阴极之间的电场分布复杂化, 为此本文采用有限元仿真分析软件 Ansoft Maxwell 3D 模拟并建立了微通道板结构和像增强器中微通道板输入端电场分布的关系模型。根据电场模拟结果分析了微通道板中不同孔径直径、孔径间距、微通道板孔的倾斜角及扩口情况对通道板输入端处电场分布情况的影响。同时讨论了电场分布变化对光生电子的运动轨迹及分辨力的影响。这项研究对高品质的微通道板的制备提供了理论基础。

关键词: 微通道板; 电场分布模拟; 微通道

中图分类号: TN223 文献标志码: A 文章编号: 1007-2276(2015)10-2981-06

Simulation research of electrostatic field of MCP input in proximity image intensifier

Song De^{1,2}, Piao Xue², Bai Xiaofeng¹, Liu Chunyang²

(1. Science and Technology on Low-Light-Level Night Vision Laboratory, Xi'an 710065, China;

2. College of Science, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

Abstract: The electrostatic distributions between Micro-channel plate (MCP) and photocathode will affect the movement locus of photogenerated electrons and the proximity image intensifier's performance. However the distributions of electrostatic fields and equipotential lines were complex due to a lot of micro-channel in the micro channel plate. So this paper simulated the electrostatic distribution of MCP input in proximity focusing low-light-level image intensifiers by the finite element simulation analysis software Ansoft Maxwell 3D. How the electrostatic distribution of MCP input were affected by micro-channel diameter, angle of micro-channel, minimum interspacing between micro-channels walls and flaring-condition of the input end of the channel were analyzed according to the simulation result. Meanwhile, the photogenerated electrons' trajectory and image intensifier's resolution affected by the change of electrostatic distribution were discussed. This study will provide a theory foundation for the fabrication of the high quality MCP.

Key words: micro-channel plate; simulation on electrostatic distribution; micro-channel

收稿日期: 2015-02-05; 修订日期: 2015-03-10

基金项目: 高等学校博士学科点专项科研基金(20112216120008); 微光夜视技术重点实验室资助项目(J20130201);

吉林省科技厅重大科技攻关专项(2014020318GX)

作者简介: 宋德(1981-), 男, 讲师, 博士, 主要从事微光成像器件方面的研究。Email: songde614@163.com

0 引言

微通道板(MCP)的实现和应用到微光像增强器后,解决了第一代微光夜视仪器体积大,笨重,防强光性差等缺点,使微光夜视技术成为夜视观瞄仪器的支撑技术之一。微通道板^[1-5]是在一块薄板上,由大量平行堆积的单通道电子倍增器组成,犹如蜂窝状的薄片式结构。随着微通道板引入到微光像增强器后实现了第二代、第三代和第四代微光夜视仪,它们有两种聚焦形式:一是锐聚焦,像管又称为倒像管;二是近贴聚焦^[6]。近贴聚焦是指微通道板被贴近放置在光阴极和荧光屏之间。在微光夜视技术的应用中,当仪器的尺寸和重量作为重要考虑因素部分时,近贴聚焦像管显示了无比可拟的优势^[7-8]。此外其噪声因子明显低于倒像管,平面的输入窗和输出窗易于加工,结构牢靠等优点。近贴型聚焦像管中光阴极和 MCP 之间类似平板电容器,光生电子在电场的作用下,以抛物线轨迹向 MCP 板投射。由于微通道板的开口率不能达到百分之百,故而电子在微通道板输入端口上部分不开口位置能发生电子弹射及反射,影响噪声因子和分辨率等参数。为了提高像管的分辨率,改善散射噪声带来的不利影响,有必要研究微通道孔直径、孔间距、孔的倾斜角和微通道孔扩口结构参数对输入端口处电场分布的影响。但由于微通道板孔道附近的尺寸在微米级别,很难用实验的方法进行测量电场分布。因此近贴聚焦微光像增强器中微通道板输入端的电场分布采用模拟运算的方法确定,电场分布的模拟越真实对确定端口附近的电子运动轨迹越有利,但是这方面的相关报道国内外数量非常少,一定程度上限制了我国近贴聚焦微光像管的实验的开展和理论水平提高。

文中将研究微光像增强器中微通道板输入端口处电场分布情况。通过 Ansoft Maxwell 软件分析不同微通道版孔径、孔径间距和微通道版孔径的倾斜角和扩口情况对近贴聚焦微通道板输入端处电场分布情况的影响。其意义是电场分布情况的真实性对确定电子运动轨迹及像管增强器的分辨力具有重要意义,这对倍增像管特别是微通道板的制作工艺具有指导意义。

1 计算方法与模型

1.1 计算方法

目前电场分析方法大致可分为两大类,基于微分方程的有限元法和基于积分方程的模拟电荷法、表面电荷法和边界元法^[9]。文中采用静电场的有限元法进行模拟计算。从静电场的微分形式基本方程

$$\tilde{N} \times E = 0 \quad NgD = \rho \quad (1)$$

可以推导出泊松方程

$$\tilde{N}^2 \varphi = -\frac{\rho}{\varepsilon} \quad (2)$$

式中: φ 为电位函数; ρ 为空间电荷密度; ε 为介电常数; \tilde{N}^2 为拉普拉斯算子,在柱坐标系,它的展开式为

$$\tilde{N}^2 \varphi = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \varphi}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} \quad (3)$$

忽略场中空间电荷的相互影响,泊松方程可化为拉普拉斯方程:

$$\tilde{N}^2 \varphi = 0 \quad (4)$$

有限元法是以变分原理和剖分插值为基础的一种通用数值计算方法。有限元法求解场的问题,不是直接求解场,而是利用变分原理把求解的边值问题转化为一个“能量”取极值的相应变分问题。在静电场中,一般取电位作为直接对象。假定每个小单元 e 内的电位函数 φ 是 r, z 的线性函数,即在每一个小单元域内,近似的看成电场是均匀的,这样任一单元中个点电位应满足下列电位插值函数

$$\varphi_i = a_1 + a_2 r + a_3 z \quad (5)$$

对于一个单元,设其 3 个节点号分别为 i, j, m (逆时针排列),起点为 i 函数应符合公式(5),则有

$$\begin{cases} \varphi_i = a_1 + a_2 r_i + a_3 z_i \\ \varphi_j = a_1 + a_2 r_j + a_3 z_j \\ \varphi_m = a_1 + a_2 r_m + a_3 z_m \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} a_1 = \frac{1}{2S_e} (a_i \varphi_i + a_j \varphi_j + a_m \varphi_m) \\ a_2 = \frac{1}{2S_e} (b_i \varphi_i + b_j \varphi_j + b_m \varphi_m) \\ a_3 = \frac{1}{2S_e} (c_i \varphi_i + c_j \varphi_j + c_m \varphi_m) \end{cases} \quad (7)$$

其中

$$\begin{cases} a_i=r_i z_m-r_m z_j & b_i=z_i-z_m & c_i=r_m-r_j \\ a_j=r_m z_i-r_j z_m & b_j=z_m-z_j & c_j=z_i-z_m \\ a_m=r_i z_j-r_j z_i & b_m=z_i-z_j & c_m=r_j-r_i \end{cases}$$

S_e 为单元 e 的面积,则

$$S_e = \frac{1}{2} \begin{vmatrix} 1 & r_i & z_i \\ 1 & r_j & z_j \\ 1 & r_m & r_m \end{vmatrix} \quad (8)$$

则 e 单元的插值函数为:

$$\varphi(x, y) = \frac{1}{2S_e} [(a_i+b_i r+c_i z)\varphi_i+(a_j+b_j r+c_j z)\varphi_j+(a_m+b_m r+c_m z)\varphi_m]$$

利用插值的方法把连续介质离散成一组单元,使无限自由度问题转化成有限自由度问题,再用计算机求解,这一有限元的基本思想转化为具体实现的过程就是有限元法的基本过程。

1.2 建模

采用有限元法模拟微通道板输入端电场分布,此方法具有适用性强,精度高等优点。它是一种基于变分法发展而来的数值计算方法,是古典变分法与分片插值法相结合的产物。该方法采用分片近似,逼近整体的思想来求解物理问题。利用有限元法计算电场分布情况的软件多种,这里采用 Ansoft Maxwell 电场分析软件分析近贴聚焦微通道板输入端电场的分布情况。物理模型采用以光电阴极为一端,带有电极材料的 MCP 为另一端,之间采用真空作为介质进行了几何建模并最终进行电场的模拟。具体流程以平板电容器为例可简单描述为建模、设置激励、设置计算参数、设置自适应计算参数、进行网格剖分设置、检查与运行并查看结果。图 1 为模拟平板电容器(既没有微通道孔时)的电场分布情况,从中可以看到等势面的分布情况。

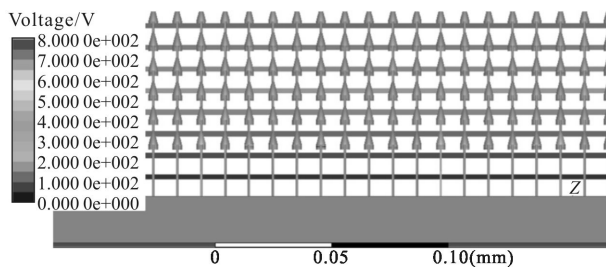


图 1 平板电容器的电场分布情况

Fig.1 Electrostatic distribution of parallel plate capacitor

2 模拟结果与讨论

2.1 微通道板中通道孔径对微通道板输入端电场分布情况的影响

建立双近贴微光像增强器中前近贴的实体模型,其中光电阴极和 MCP 间距 $150 \mu\text{m}$,光阴极厚度为 $10 \mu\text{m}$,MCP 板厚度 $12 \mu\text{m}$,通道圆孔数目为 19 个,通道与通道孔壁间距最小为 $2 \mu\text{m}$,孔倾斜角为 15° ,MCP 上覆盖一薄镍铬金属导电层。改变微通道板的通道孔径,对第一近贴聚焦系统进行电场分布模拟。

图 2(a)为当微通道板具有 $10 \mu\text{m}$ 微通道孔直径时,靠近微通道板输入端的等势面分布情况。从图 2(a)中的内图可见,在靠近微通道板一侧由于微通道的存在,其等势面分布不像没有微通道孔存在时的等势面是平行于微通道板表面的(图 1),而是在

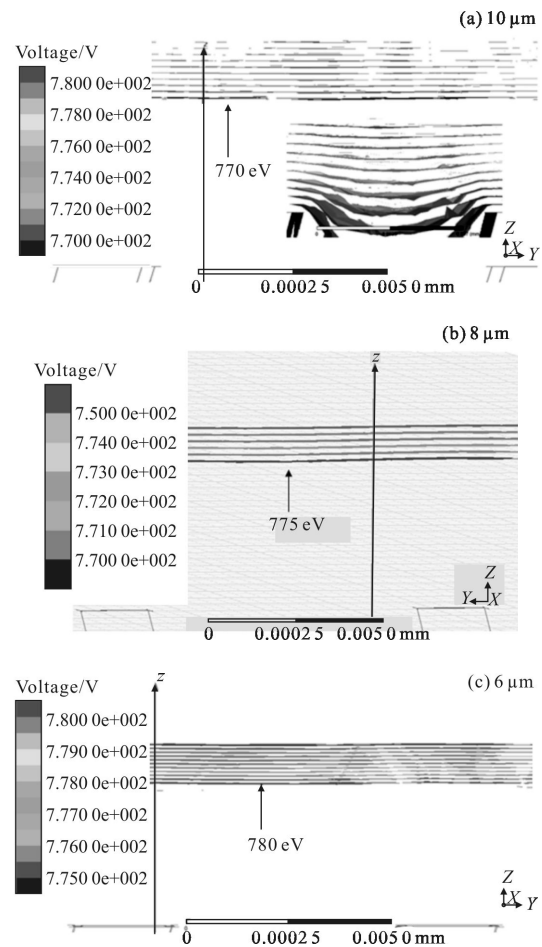


图 2 不同微通道直径时输入端的电场分布情况

Fig.2 Electrostatic distribution for the input of MCP with different MCPs' micro-channel diameter

通道口附件有弯曲现象,且越靠近微通道板表面弯曲程度越大,远离时弯曲程度减小,这说明由于微通道口的存在,会使电子的运动轨迹发生离散,电子轨迹向远离通道中心的位置发生偏移,这使电子进入临近孔的几率增加而降低图像分辨力。同时从图 2 中可见当等势面 770 eV 时,其等势面的弯曲现象减小至趋向于平行于微通道板表面。对比图 2(a), (b)和(c)可见在随着孔径的减小(10、8、6 μm),其等势面弯曲趋向于平行于微通道板表面的等势面值越来越大(770 eV, 775 eV 和 780 eV),即其越来越贴近微通道板一侧。说明电子的发散作用随着孔径的减小而减弱。

2.2 微通道板中通道孔间距对微通道板输入端电场分布情况的影响

建立双近贴微光像增强器中前近贴的实体模型,其中光电阴极和 MCP 间距 150 μm ,光阴极厚度为 10 μm ,MCP 板厚度 12 μm ,通道圆孔数目为 19 个,微通道板的通道孔直径为 8 μm ,孔倾斜角为 30°,MCP 上覆盖一薄镍铬金属导电层。模拟不同孔壁间距的最小距离(0.5、1、2 和 4 μm)对第一近贴聚焦系统电场分布的影响。

图 3 为不同微通道间距时近贴聚焦像增强器中前近贴输入端的电场分布情况,从图中可见具有相

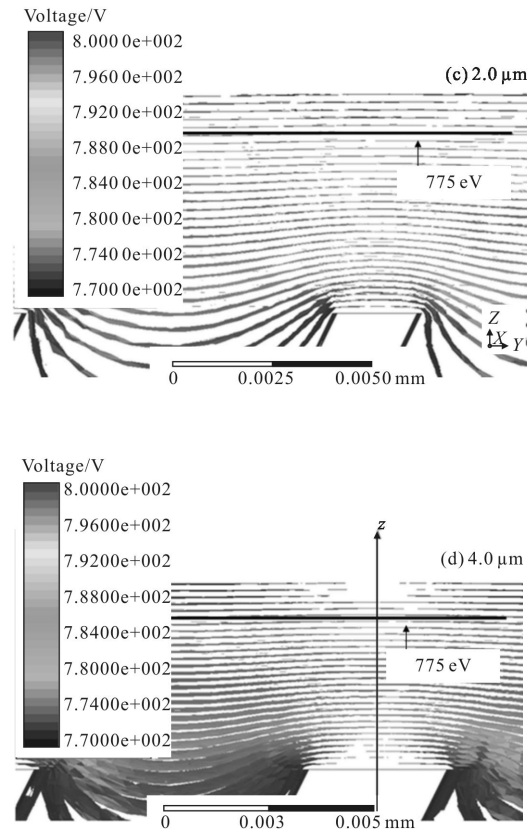


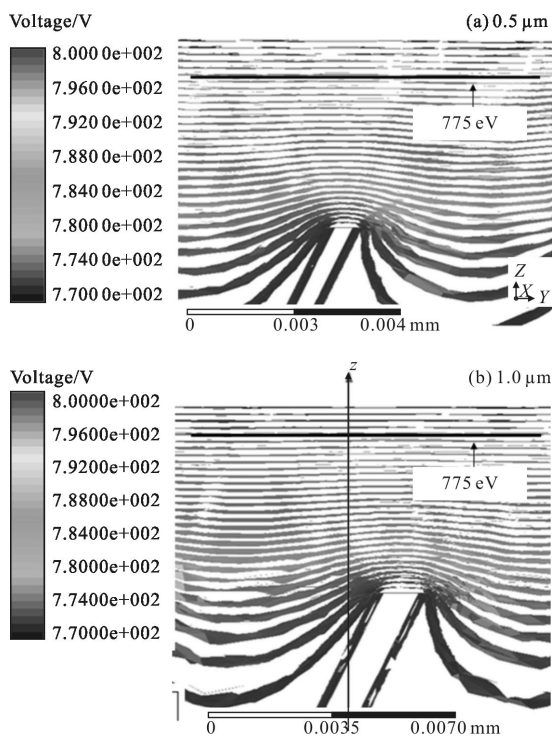
图 3 不同微通道间距时输入端的电场分布情况
Fig.3 Electrostatic distribution for MCP with different interspacings between micro-channels walls

同微通道直径但不同微通道间距时,趋向于平行于微通道板表面的等势面都为 775 eV。没有微通道孔的位置上方其等势面具有电子会聚作用,间距小于 1 μm 有利于电子入射到微通道孔中。

2.3 微通道板中通道孔倾斜角对输入端口处电场分布情况的影响

建立双近贴微光像增强器中前近贴的实体模型,其中光电阴极和 MCP 间距 150 μm ,光阴极厚度为 10 μm ,MCP 板厚度 12 μm ,通道圆孔数目为 19 个,微通道板的通道孔直径为 8 μm ,孔壁间最小距离 2 μm ,MCP 上覆盖一薄镍铬金属导电层。模拟不同倾斜角(15°和 30°)对第一近贴聚焦系统的电场分布情况。

从图 4 中可见倾斜角 15°和 30°时,趋向于平行于微通道板表面的等势面都为 775 eV,即倾斜角对微通道口上端的电场分布情况影响很小,不影响电子的轨迹。



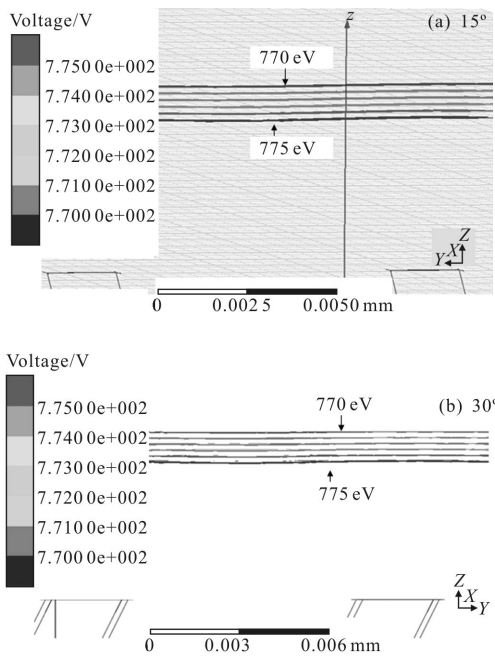


图 4 不同微通道孔倾斜角时输入端的电场分布情况
Fig.4 Electrostatic distribution for MCP with different angles of micro-channel

2.4 微通道板扩口情况对输入端口处电场分布情况的影响

建立双近贴微光像增强器中前近贴的实体模型,其中光电阴极和 MCP 间距 $150\ \mu\text{m}$,光阴极厚度为 $10\ \mu\text{m}$,MCP 板厚度 $12\ \mu\text{m}$,通道圆孔数目为 19 个,微通道板的通道孔直径为 $4\ \mu\text{m}$,微通道孔间距 $10\ \mu\text{m}$,微通道孔倾斜角为 0° ,MCP 上覆盖一薄镍铬金属导电层。模拟微通道孔不同扩口直径(非扩口, $6, 8, 9.8\ \mu\text{m}$)对第一近贴聚焦系统的电场分布情况。

图 5 为不同扩口直径情况下微通道板输入端的电场分布情况。图 5(a)~(d)分别为非扩口, $6\ \mu\text{m}$, $8\ \mu\text{m}$, $9.8\ \mu\text{m}$ 扩口直径下电场的分布情况,从图中可见扩口情况下扩口直径越接近通道孔间距时越有利于电子入射到微通道孔中。等势面的弯曲现象减小至趋向于平行于微通道板表面的等势面依次为 $785\ \text{eV}$,

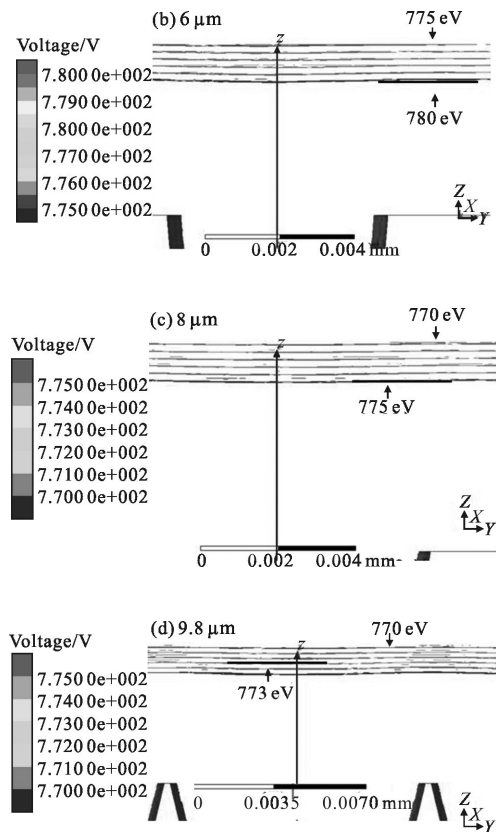
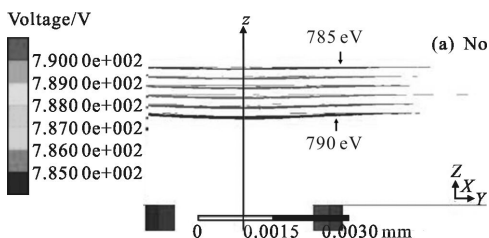


图 5. 不同扩口直径时输入端的电场分布情况
Fig.5 Electrostatic distribution for MCP with different micro-channel flaring diameter

$780\ \text{eV}$, $775\ \text{eV}$, $773\ \text{eV}$,可见微通道板扩口情况下电场的分布对电子的发散作用随着通道孔的扩口直径增加而增强,但是从图中可见相对而言扩口直径越大越有利于电子入射到通道孔中。

3 结 论

采用有限元法进行模拟计算了近贴聚焦微光像增强器中微通道板输入端口处电场分布情况。分析微通道板中不同孔径直径、孔径间距、微通道板孔的倾斜角及扩口情况对近贴聚焦微通道板输入端口处电场分布情况的影响。随着微通道孔径的减小,其等势面弯曲趋向于平行于微通道板表面的等势面值越来越大,即电子的发散作用随着孔径的减小而减弱。不同通道孔间距的模拟说明孔间距越小越有利于电子入射到微通道孔中,同时微通道的倾斜角对输入端口电场分布情况影响不大。微通道板扩口直径下电场分布研究表明扩口直径越大越有利于电子入射到通道孔中但电场对电子散射作用也进一步增强。可见微通道板输入端的电场分布模拟研究有利于确定光



生电子的运动轨迹, 这为高分辨力的微通道板的制作提供了理论基础。

参考文献:

- [1] Corbett M B, Laprade B N. Performance of long-life curved channel microchannel plate[C]//SPIE, 1989, 1072: 130-135.
- [2] Laprade B N, Reinhart S T, Recent advances in small pore microchannel technology [C]//SPIE, 1989, 1072: 119-124.
- [3] Horton J R, Tasker G W. Characteristics and applications of advanced technology microchannel plates [C]//SPIE, 1990, 1306: 169-178.
- [4] Zhou Liwei. On figure of merit of low light level image intensifiers [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2004, 33 (4): 333-334. (in Chinese)
- [5] Hayashida M, Mirzoyan R, Teshima M. Development of HPDs with an 18-mm-diameter GaAsP photocathode for the MAGIC - II [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, 2006, 567: 180-183.
- [6] Zhu Yufeng, Shi Feng, Liu Shulin, et al. Analysis and test on noise factor of Micro-channel plate with ion barrier film [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(2): 499-502. (in Chinese)
- [7] Xie Jianfeng, Wang Yingrui. Compare and research imaging performances of low light CCD imaging devices[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35(5): 66-67. (in Chinese)
- [8] Tan Kexiong, Xue Jialin. Numerical Calculation of High-voltage Electrostatic Field [M]. Beijing: Water Conservancy Electric Power Press, 1990. (in Chinese)