

引用格式: QIU Ya-feng, YAN Wu-ling, HUA Sang-tun. Resolution Research of Low-light-level Image Intensifier Based on Electronic Trajectory Tracking[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2020, 49(12):1223003

邱亚峰,严武凌,华桑瞰. 基于电子追迹算法的微光像增强器分辨力研究[J]. 光子学报, 2020, 49(12):1223003

基于电子追迹算法的微光像增强器分辨力研究

邱亚峰,严武凌,华桑瞰

(南京理工大学 机械工程学院,南京 210094)

摘 要:针对目前的微光像增强器分辨力计算理论模型存在着不够精确,不能直观给出优化条件等问题,提出了一种基于电子追迹算法的理论模型.通过均匀掺杂 GaAs 电子散射公式对阴极内光电子运输建模得到不同于朗伯体分布的出射电子分布,将近贴系统近似为纵向均匀电场并建立前、后近贴电子运输模型,在非异常工作情况下以次级电子出射分布为基础建立微通道板内电子运输模型,最后得到荧光屏电子圆斑,并用蒙特卡洛法计算调制传递函数,以 0.3 为标准得到极限分辨力.对四种不同型号像管的分辨力进行计算,计算结果与实验结果最大误差仅为 5.0%,低于已有模型误差(超过 10%),证明了该模型具有较好的实用价值和应用前景.

关键词:像增强器;光电阴极;电子轨迹;分辨力;调制传递函数

中图分类号:TN223

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20204912.1223003

Resolution Research of Low-light-level Image Intensifier Based on Electronic Trajectory Tracking

QIU Ya-feng, YAN Wu-ling, HUA Sang-tun

(School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: Aiming at the problem that the current theoretical models for calculating the resolutions of low-light-level image intensifiers are not accurate enough and can't provide the optimization conditions intuitively, a theoretical model based on electron tracking is proposed. Electron scattering formula of uniform-doping GaAs photocathodes is used for obtaining the distribution of emitted electrons, which is different from the Lambertian distribution. The proximity system is approximated to a longitudinal uniform electric field to establish the electron transport model. Based on the secondary electron emission distribution, the electron transport model in the microchannel plate is established under non-abnormal working conditions. With the distribution of the electron beams on the phosphor screen, the modulation transfer function is calculated by Monte Carlo method, and the limiting resolution is obtained by taking the standard value as 0.3. The resolutions of four different types of image intensifiers are calculated, and the results show that the largest error between the model simulation results and the experimental results is only 5.0%, less than the errors from the existing models (more than 10%), which proves the practical value and good application prospect of the model.

Key words: Image intensifier; Photocathode; Electron tracks; Resolution; Modulation transfer function

OCIS Codes: 230.2090; 110.4100; 250.1500; 040.3780; 060.2350

基金项目:国防预研基金(No.1171011485)

第一作者:邱亚峰(1966—),男,副教授,博士,主要研究方向为光电子物理与技术. Email: njlgcn@sina.com

收稿日期:2020-07-06;录用日期:2020-09-11

<http://www.photon.ac.cn>

0 引言

微光夜视技术是在黑夜或暗处条件,实现光电图像信息相互转换、增强、处理和显示等物理过程的技术,微光像增强器(夜视仪)是具有代表性的技术产品.三代微光像增强器^[1]由光电阴极、微通道板(Microchannel Plate, MCP)和荧光屏组成,其质量好坏主要取决于总体极限分辨力,故分辨力理论计算模型的精确性很大程度上影响其生产效率、质量及优化方向.在微光像增强器各个部件中,对于GaAs负电子亲和势(Negative Electron Affinity, NEA)光电阴极的研究比较深入,目前研究对象主要为均匀掺杂和变掺杂NEA GaAs阴极,已有不少文献对这两种阴极的电子发射特性做出研究^[2-7].从研究结果来看,无论是均匀掺杂还是变掺杂其极限分辨力都在800 lp/mm以上^[8-10],远大于现有的微光像增强器的极限分辨力,可知阴极并不是影响微光像增强器分辨力的主要部件,需要将其各部分联系进行整体研究.YAN Lei等^[11]提出一种使用蒙特卡洛方法来计算微光像增强器调制传递函数^[12-13](Modulation Transfer Function, MTF)的研究成果,其采取的方法是计算出各个部分的MTF_n再将其依次相乘来计算出总的MTF,而阴极MTF一般取为1,所得结果没有考虑阴极的影响,且由于阴极内部电子运动情况复杂,之前的研究普遍将阴极电子出射角度按照朗伯体分布处理^[14-15],导致结果会损失一部分精度,误差率在10%以上.WU Mei-juan等提出基于蒙特卡洛方法的模型^[16],但其同样将阴极电子出射角度按照朗伯体分布处理,虽然模拟结果与实验结果相差较小,但实验数据^[17]的精度并不高,故其模型可靠性无法得到保证.

本文考虑了阴极的影响,基于电子在阴极内部运动模型仿真得出的出射分布,建立电子从阴极面发射到荧光屏的运动模型,包括前、后近贴及MCP通道运输模型.通过仿真得到电子运输轨迹及荧光屏上的落点圆斑,最后用蒙特卡洛方法得出MTF及其对应的微光像增强器极限分辨力.本文研究对微光像增强器系统设计具有指导意义.

1 阴极体内电子运输模型

电子运输模型包括电子在阴极内,前、后近贴及微通道板通道内的运输模型.首先研究GaAs阴极体内的运输模型^[10,18].

考虑到强电场作用、声子散射以及势垒表面反射等各种因素的作用,电子在阴极内部的传输较为复杂.本研究略去了次要因素,只考虑影响电子阴极出射分布的两个主要因素:一个是弹性散射;另一个是晶格振动造成的能量损失,其设置为与电子移动的轨迹距离呈线性关系.

设GaAs材料掺杂Be原子, $\text{Ga}_{0.5N-1}\text{As}_{0.5N}\text{Be}$ 为均匀掺杂光电阴极的基本结构单元,其中N为基本结构单元中Ga原子和As原子浓度与掺杂原子Be的浓度之比,利用卢瑟福散射理论来模拟光电阴极体内光电子散射,得出其散射公式

$$\tan\left(\frac{\varphi}{2}\right) = \frac{0.1093}{E_0 b_e} \quad (1)$$

式中, E_0 是光电子散射前的能量,单位为eV. b_e 是Be离子到光电子运动路径延长线的垂直距离,单位为nm.

根据电子在均匀掺杂GaAs阴极的运动散射理论公式,建立电子在阴极体内的运动仿真模型.考虑不同波段(400~900 nm)的光所激发的光电子数量在阴极不同位置有所差异,根据不同波段激发的光电子数与吸收位置的关系,通过模拟阴极体内光电子的运输过程,仿真得出电子的出射角度.取光电阴极发射层厚度为2.3 μm ,窗口材料GaAlAs厚度为1.5 μm ,光电阴极Be掺杂浓度为 $1.2 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$,得出光电阴极电子出射角度分布,与朗伯体分布对比,如图1所示.其中电子出射角度 α 从 -90° 到 90° 以步长 3° 变化, n/N 为出射角度 α 的电子数与总电子数比值.

图1表明电子出射角分布与朗伯体分布接近,但仍存有较大的浮动差异,将其分布数据保存,作为理论模型的阴极电子出射分布函数处理.

GaAs光电阴极电子的出射能量分布模型目前较为流行的有Beta分布模型^[14]及Maxwell分布模型^[19].但由于在像管近贴系统中Maxwell分布模型表现较差,故本模型选用较符合实际的Beta分布^[20],即

$$\beta_{m,n} = \frac{(m+n+1)!}{m! n!} \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_m}\right)^m \left(1 - \frac{\epsilon}{\epsilon_m}\right)^n \quad (2)$$

对于均匀掺杂GaAs阴极来说,取 $m=1, n=8$ 时比较符合实际情况.

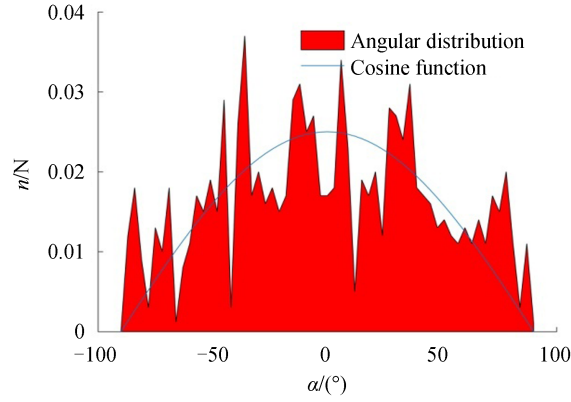


图1 阴极电子出射角分布

Fig.1 Angular distribution of the emission electrons of the photocathode

2 阴极体外电子运输模型

2.1 微通道板内电子运输模型

与电子在阴极内部的运输模型类似,微通道板内电子的运输过程也较为复杂,不仅要考虑管壁材料电子发射特性,还需考虑末端电极、管壁电荷^[21]对电子轨迹的影响,为了方便建模,本文只考虑非异常工作情况下的主要因素.光电子运输到MCP发射材料表面与其有一定的入射角 γ ,其次级发射电子能量 E_n 可表示为

$$E_n = E_m \times \sin(\gamma) \quad (3)$$

式中, E_m 为次级发射电子的最大能量.

MCP通道内壁中次级电子发射前几乎各向同性,基本可认为不同发射角度对应的光电子数服从余弦分布.通道壁发射的次级电子数目表示为

$$N(E_n, \epsilon) = N(E_n) \cos(\epsilon) \quad (4)$$

式中, $N(E_n)$ 为不同发射能量的光电子数目^[22].

2.2 近贴系统电子运输模型

近贴系统适用于阴极与MCP入射端及MCP出射端与荧光屏之间,可以近似看成由纵向均匀电场构成,由于在运动过程中只在纵向受力,期间形成抛物线轨迹,易求得落点速度及位置物理信息.当电子以初速度 v_0 与法线夹角 θ_0 射出并纵向位移 L 距离时,其在 Z 、 R 方向的速度与位移可表示为

$$\begin{cases} v_z = v_0 \sin\theta_0 + a \times \frac{L}{v_0 \sin\theta_0} \\ v_r = v_0 \cos\theta_0 \\ z = L \\ r = \frac{L}{\tan\theta_0} + \frac{a}{2} \left(\frac{L}{v_0 \sin\theta_0} \right)^2 \end{cases} \quad (5)$$

由式(5)可以确定电子在荧光屏上落点分布情况,由此计算调制传递函数,即^[23]

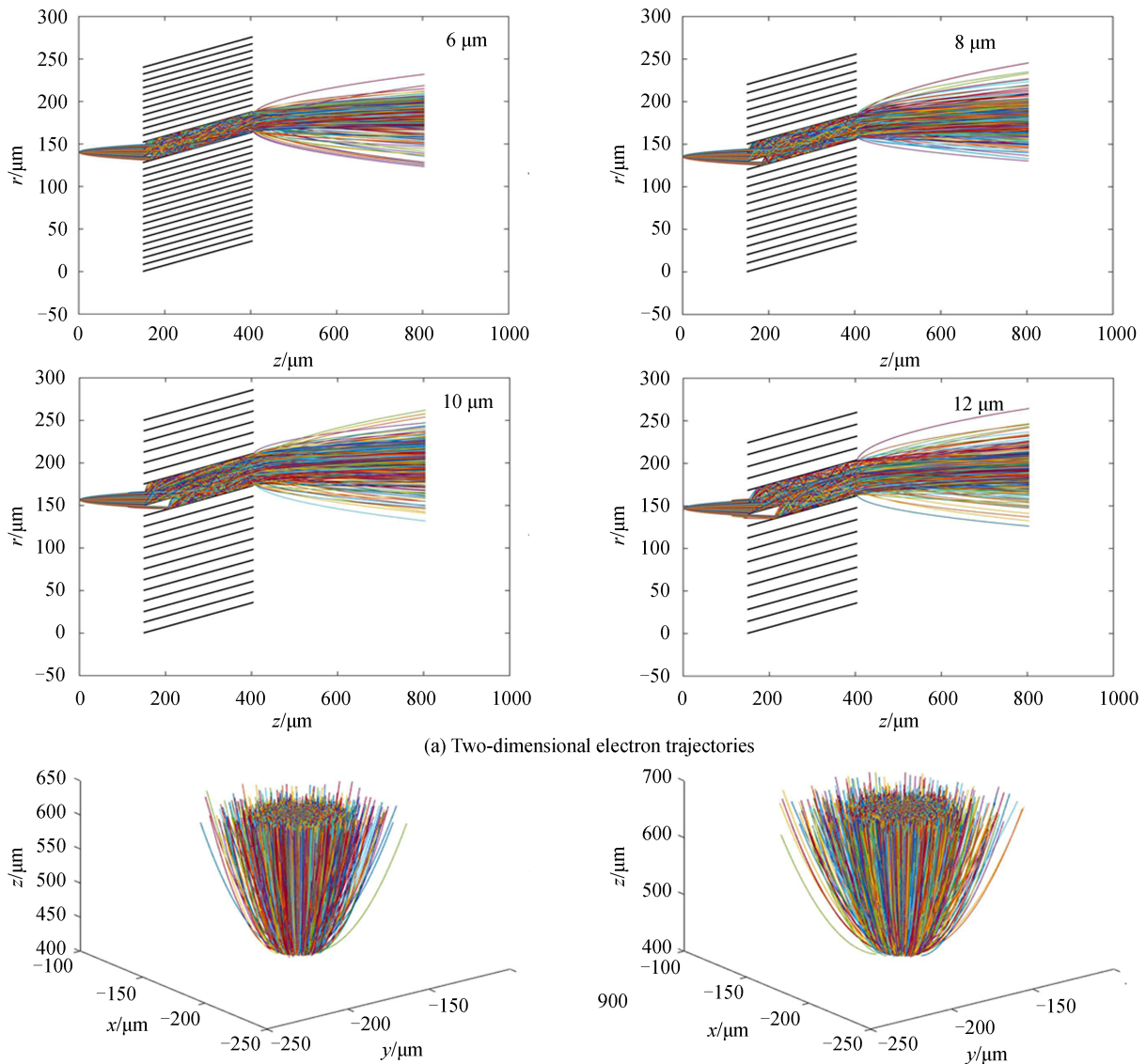
$$\begin{cases} L(x) = \int_{-\infty}^{\infty} P(x, y) dy \\ M_c = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} L(x) \cos(2\pi fx) dx}{\int_{-\infty}^{\infty} L(x) dx} \\ M_s = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} L(x) \sin(2\pi fx) dx}{\int_{-\infty}^{\infty} L(x) dx} \\ \text{MTF} = M(f) = (M_c^2 + M_s^2)^{1/2} \end{cases} \quad (6)$$

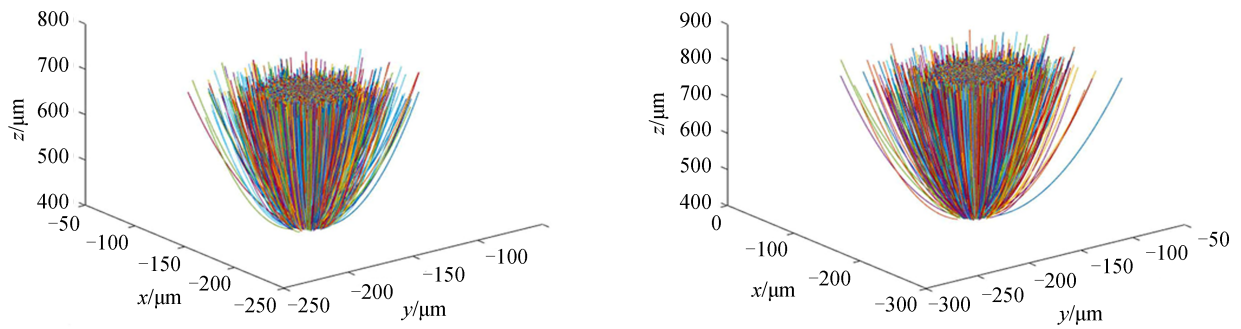
式中, $P(x, y)$ 是荧光屏像面上的光强度, $L(x)$ 为线扩散函数. 对线扩散函数做离散傅里叶变换, 计算得到调制传递函数.

3 仿真结果

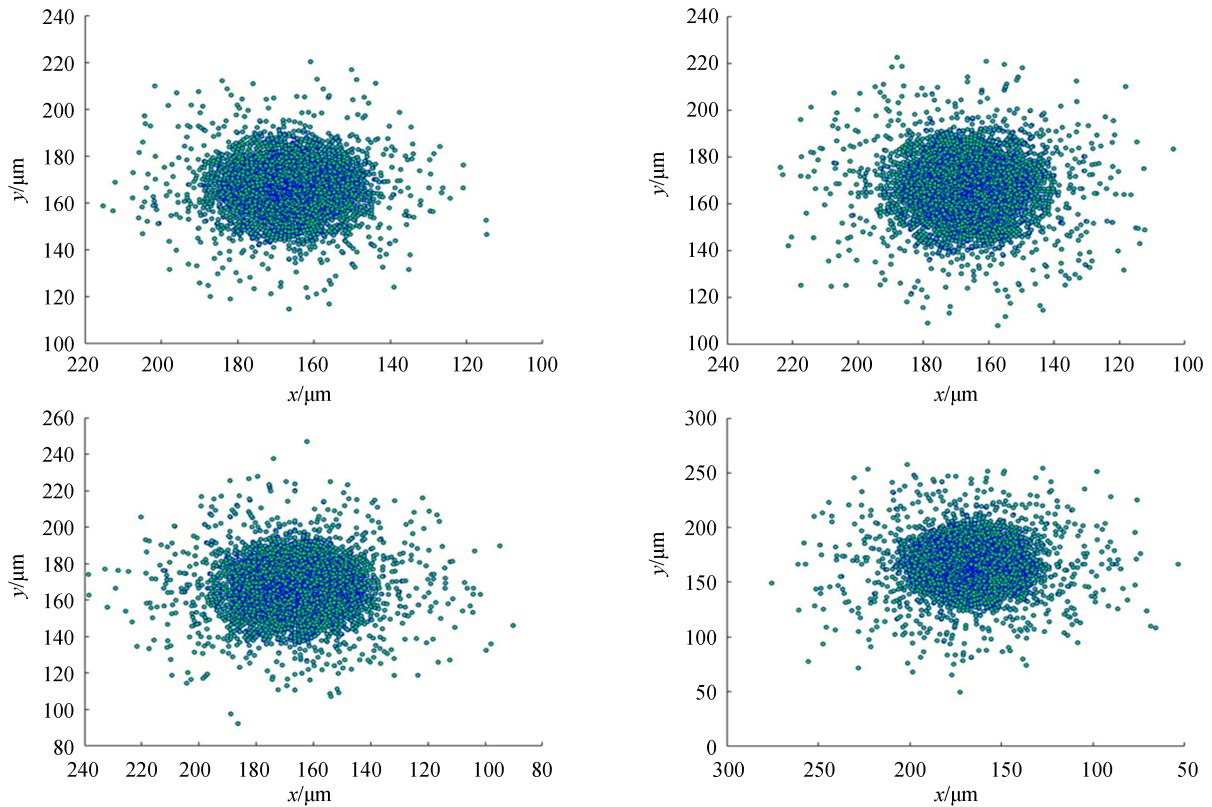
为了便于对比, 设置与文献[16]相同的参数. 设前近贴距离 $D_1=150 \mu\text{m}$ 、MCP 长度距离 $D_2=254 \mu\text{m}$ 、第二近贴距离 $D_3=400 \mu\text{m}$ 、前近贴电压 $V_1=800 \text{V}$ 、微通道板两端电压 $V_2=1000 \text{V}$ 、后近贴电压 $V_3=5000 \text{V}$, 微通道板通道直径 d 由 $6 \mu\text{m}$ 变化到 $12 \mu\text{m}$, 步长为 $2 \mu\text{m}$. 模拟光电阴极受激出射电子, 光电子的角度变化范围为 $-89^\circ \sim 89^\circ$, 步长为 2° , 能量变化范围为 $0.2 \sim 1.0 \text{eV}$, 步长 0.03eV , 得到电子运动轨迹如图 2 所示.

图 2(a) 以二维方式展示了阴极某点出射电子在前、后近贴及 MCP 管壁中的运动, 直到荧光屏处消失. 随着 MCP 通道直径的增加, 其通道出口处的电子束会趋于发散, 如图 2(b) 所示. 最终其在荧光屏形成的电子圆斑也会依次增大, 如图 2(c) 所示. 由荧光屏上电子圆斑的分布情况, 并根据式(6)来计算每种像增强器对应的 MTF 曲线, 如图 3 所示, 显然相同 MTF 下, 微通道板通道直径越小, 其所对应的空间频率越大. 取 $\text{MTF}=0.3$ 即可求得对应极限分辨力.





(b) Three-dimensional electron trajectories of rear proximity system



(c) Electron distribution on the phosphor screen

图2 不同MCP管径的电子运输轨迹仿真

Fig. 2 The simulation of photoelectrons transportation consists of different channel diameters

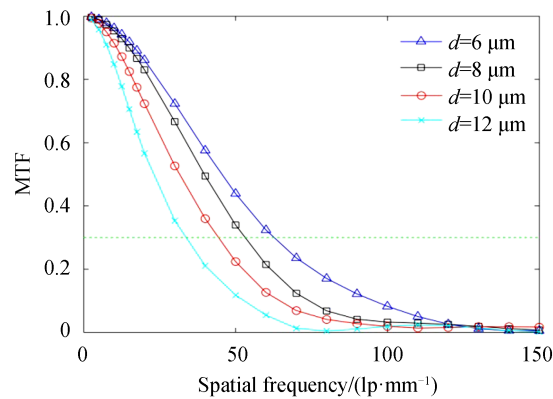


图3 不同参数对应的MTF曲线

Fig. 3 MTF curves of different parameters

4 实验及结果对比

如图4所示,用实验来对理论模型进行验证,仪器包括光源、平行光管、USAF1951靶、像增强器和CCD相机,实验使用的是RES-1分辨率测试靶(部分透明),由NEWPORT公司提供.卤素钨灯发出白光束,经过中性滤光片及可变光阑后才到达平行光管(F1000),在穿过平行光管后,光束以2 933 K的色温穿过测试靶并将分辨力靶图案投射在被测像管的阴极入射面上,最后通过观察CCD相机(2 416万像素)上线对的数量,在靶标分辨力查找表找到对应的分辨力.

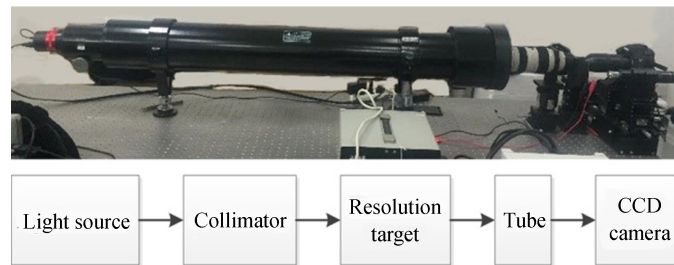


图4 实验装置
Fig.4 Experiment setup

光束的光强介于 10^{-3} lx与 10^{-4} lx之间,且有效光照区域的光强不均匀度不超过1.5%,可以保证结果的有效性.测试了四组不同型号的像增强器(北方夜视公司提供),其MCP的通道直径从 $6\ \mu\text{m}$ 到 $12\ \mu\text{m}$ 以 $2\ \mu\text{m}$ 步长依次增加,其它参数如阴极参数、电压、距离和

MCP长度参数与仿真所用参数保持一致.观测结果如图5所示.

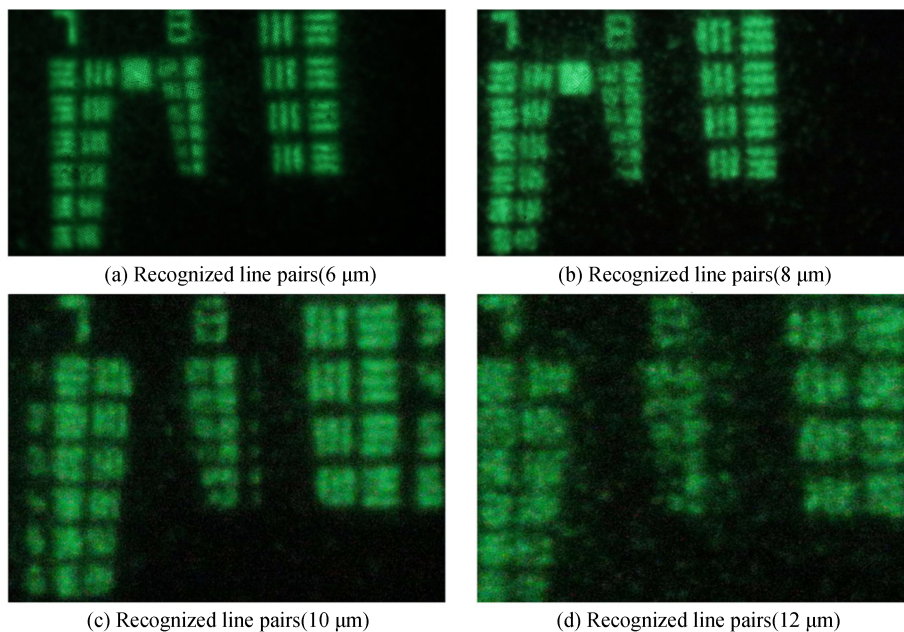


图5 像增强器能清晰辨认的对线数图片

Fig.5 Photographs representing numbers of the line pairs which the image intensifiers can clearly distinguish.

随着通道直径的增加,可识别的对线数量不断减少,在通道直径达到 $12\ \mu\text{m}$ 时不能区分第七单元的任何对线.而在通道直径减小至 $6\ \mu\text{m}$ 时,已经能辨认第七单元的所有对线.通过靶标分辨力查找表,得到了四个像管的极限分辨力,与本文模拟结果进行对比,如表1所示.

由表1可知分辨力测量结果与实验结果的误差非常小,最大误差仅为5.0%,远小于已有模型结果的10%以上的误差.将文献[16]中的结果与本文实验结果进行对比并计算误差,与模拟结果比较如图6所示.

表1 仿真结果与实验结果
Table 1 Simulation results and experimental results

Tube	$d/\mu\text{m}$	$D/\mu\text{m}$	Resolution(simulation)/ ($\text{lp}\cdot\text{mm}^{-1}$)	Resolution(experiment)/ ($\text{lp}\cdot\text{mm}^{-1}$)	Error/%
1	6	8	64.5	61.4	5.0
2	8	10	54.0	53.2	1.5
3	10	12.5	43.4	44.3	2.0
4	12	14	32.3	33.2	2.7

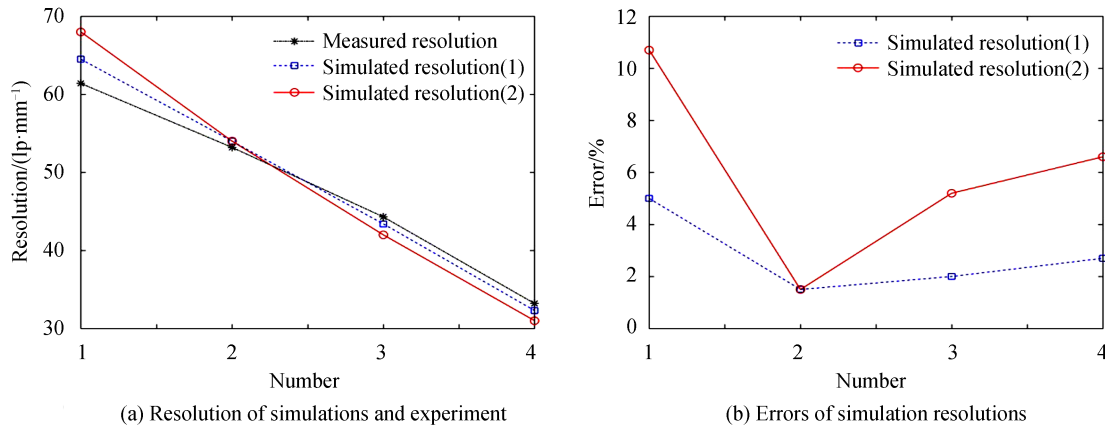


图6 仿真和实验分辨力结果

Fig.6 Resolution results of simulations and experiment

图6分别用“(1)”和“(2)”指代本文模型与文献[16]模型,横坐标为像管型号.图6(a)结果显示本文模拟结果较文献[16]更贴近测量结果,文献[16]中的模拟结果与本文实验结果对比其最大误差可达10.7%,如图6(b)所示.且本文模型随着MCP管径参数的改变,所得分辨力的大小变化一致,证明该模型拥有精确性和较好的泛化能力.

5 结论

本文提出的分辨力计算模型有两个主要特点:1)将阴极部分纳入影响因素,通过均匀掺杂GaAs阴极电子散射公式计算得出电子出射分布,提高精度.2)将微光像增强器各部分级联进行整体研究,其包括前、后近贴以及微通道板,得到电子输运模型,再进行电子追迹并由荧光屏落点圆斑计算MTF曲线,提高精度并且直观地给出分辨力的优化条件.通过比对本文模型与已有模型的仿真结果与实验结果的差异,证明本文模型较大幅度提高了精确性,同时模型理论有所完善.本文为微光像增强器优化生产、制造提供了一种更具参考性的理论模型.

参考文献

- [1] AI Ke-cong. Development and prospect of low-light-level (LLL) night vision technology[J]. *Journal of Applied Optics*, 2006, **27**(4): 303-307.
艾克聪. 微光夜视技术的进展与展望[J]. *应用光学*, 2006, **27**(4): 303-307.
- [2] ZHU Sha-lu, CHEN Liang, QIAN Yun-sheng, *et al.* Characteristic research of uniform-doping and exponential-doping Ga_{1-x}Al_xAs/GaAs photocathode with femtosecond laser illumination[J]. *Optik*, 2019, **183**: 629-634.
- [3] NIU Jun, ZHANG Yi-jun, CHANG Ben-kang, *et al.* Influence of exponential doping structure on the performance of GaAs photocathodes[J]. *Applied Optics*, 2009, **48**(29): 5445-5450.
- [4] WANG Xiao-hui, CHANG Ben-kang, QIAN Yun-sheng, *et al.* Comparison between gradient-doping and uniform-doping GaN photocathodes[J]. *Acta Physica Sinica*, 2011, **60**(4): 047901.
王晓辉,常本康,钱芸生,等. 梯度掺杂与均匀掺杂GaN光电阴极的对比研究[J]. *物理学报*, 2011, **60**(4): 047901.
- [5] ZHANG Yi-jun, ZHAO Jing, ZOU Ji-jun. The high quantum efficiency of exponential-doping AlGaAs/GaAs

- photocathodes grown by metalorganic chemical vapor deposition[J]. *Chinese Physics Letters*, 2013, **30**(4): 044205.
- [6] ZHANG Yi-jun, NIU Jun, ZHAO Jing. Improvement of photoemission performance of a gradient-doping transmission-mode GaAs photocathode[J]. *Chinese Physics B*, 2011, **20**(11): 118501.
- [7] HAO Guang-hui, HAN Pan-yang, LI Xing-hui, *et al.* The electrom emission characteristics of GaAs photocathode with vacuum-channel structure[J]. *Acta Physica Sinica*, 2020, **69**(10): 266-272.
郝广辉, 韩攀阳, 李兴辉, 等. 真空沟道 GaAs 光电阴极电子发射特性[J]. *物理学报*, 2020, **69**(10): 266-272.
- [8] DENG Wen-juan, ZHANG Dao-lin, ZOU Ji-jun, *et al.* Resolution characteristics of graded band-gap reflection-mode AlGaAs/GaAs photocathodes[J]. *Optics Communications*, 2015, **356**(1): 278-281.
- [9] WANG Hong-gang, QIAN Yun-sheng, DU Yu-jie, *et al.* Resolution properties of reflection-mode exponential-doping GaAs photocathodes[J]. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 2014, **24**: 215-219.
- [10] REN Ling, CHANG Ben-kang. Modulation transfer function characteristic of uniform-doping transmission-mode GaAs/GaAlAs photocathode[J]. *Chinese Physics B*, 2011, **20**(8): 087308.
- [11] YAN Lei, SHI Feng, CHENG Hong-chang, *et al.* Monte Carlo simulation of electron transport in low-light-level image intensifier[J]. *Optik*, 2015, **126**(2): 219-222.
- [12] ORTIZ S, OTADUY D, DORRONSORO C. Optimum parameters in image intensifier MTF measurements[C]. SPIE, 2004, **5612**: 382-391.
- [13] ZHU Hong-guan, WANG Kui-lu, XIANG Shi-ming, *et al.* Dynamic modulation transfer function measurement of image intensifiers using a narrow slit[J]. *Review Scientific Instruments*, 2008, **79**(2): 023708.
- [14] REN Ling, SHI Feng, GUO Hui, *et al.* Numerical calculation method of modulation transfer function for preproximity focusing electron-optical system[J]. *Applied Optics*, 2013, **52**(8): 1641-1645.
- [15] TAO Yu, JIN Wei-qi, WANG Yao, *et al.* The MTF analysis of high performance proximity image intensifier[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2016, **45**(6): 0604003.
陶禹, 金伟其, 王瑶, 等. 高性能近贴式像增强器的调制传递函数分析[J]. *光子学报*, 2016, **45**(6): 0604003.
- [16] WU Mei-juan, REN-Ling, CHANG Ben-kang, *et al.* Simulation of image intensifier resolution in Monte Carlo method [J]. *Journal of Vacuum Science and Technology*, 2012, **32**(9): 798-801.
武梅娟, 任玲, 常本康, 等. 运用蒙特卡罗方法分析像增强器分辨率[J]. *真空科学与技术学报*, 2012, **32**(9): 798-801.
- [17] FU Wen-hong. Research on the theory, experiment and test technology of MCP flare process [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2006: 67-68.
傅文红. MCP 扩口工艺的理论、实验与测试技术研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2006: 67-68.
- [18] ZHAO Jing, ZHANG Yi-jun, CHANG Ben-kang, *et al.* Research on quantum efficient fitting and structure of high performance transmission-mode GaAs photocathode[J]. *Acta Physica Sinica*, 2011, **60**(10): 679-685.
赵静, 张益军, 常本康, 等. 高性能透射式 GaAs 光电阴极量子效率拟合与结构研究[J]. *物理学报*, 2011, **60**(10): 679-685.
- [19] GU Li, LI Xiang, ZHOU Jun-lan, *et al.* Photoelectron emission characteristics of photocathode by Monte Carlo method [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2018, **35**(5): 539-543.
顾礼, 李翔, 周军兰, 等. 光电阴极光电子发射特性的蒙特卡洛方法研究[J]. *量子电子学报*, 2018, **35**(5): 539-543.
- [20] SHENG Qing-gai. Theoretical basis of the camera tube[M]. Beijing: Science Press, 1984.
沈庆垓. 摄像管理论基础[M]. 北京: 科学出版社, 1984.
- [21] XIE Yun-tao, ZHANG Yu-jun, SUN Xiao-quan. Monte-Carlo simulation of output electron cloud from a microchannel plate in a saturation mode[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2017, **46**(11): 1125001.
谢运涛, 张玉钧, 孙晓泉. 饱和模式下微通道板输出电子云的 Monte-Carlo 仿真[J]. *光子学报*, 2017, **46**(11): 1125001.
- [22] XUE Zeng-quan, WU Quan-de. Electron emission and electron spectroscopy [M]. Beijing: Peking University Press, 1993.
薛增泉, 吴全德. 电子发射与电子能谱[M]. 北京: 北京大学出版社, 1993.
- [23] FENG Chi-dao. Design and analysis of image tube[M]. Beijing: National Defence Industrial Press, 1990: 184-192.
冯炽焘. 像管的设计与分析[M]. 北京: 国防工业出版社, 1990: 184-192.