

doi: 10.3788/gzxb20164504.0423005

多聚焦极栅控电子模拟源的研究

强鹏飞¹, 李林森^{1,2}, 刘舵^{1,2}, 刘永安¹, 盛立志¹, 赵宝升¹

(1 中国科学院西安光学精密机械研究所 瞬态光学与光子技术国家重点实验室, 西安 710119)

(2 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要:采用电子光学软件设计模拟了一种长焦距多聚焦级的电子枪结构. 利用电子透镜原理分析多聚焦极电子枪的电子束斑产生, 依据不同栅控电压, 分析零场模式、拒斥场模式和肖特基场模式 3 种阴极电子发射方式下电子聚焦情况. 模拟结果表明: 拒斥场模式和肖特基场模式对电子束流密度分别有减弱和增强的作用; 当聚焦极电压比 $U_1 : U_2 : U_3 : U_4 : U_5 = 5 : 8 : 15 : 70 : 100$ 时, 能量为 30 keV 的电子束斑最小, 在 10 m 处焦斑大小为 160 mm.

关键词:空间环境; 电子光学; 电子光学软件; 多级聚焦; 栅控电子模拟源

中图分类号: TP311

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2016)04-0423005-6

Grid-control Electron Gun with Multiple Focusing Electrode

QIANG Peng-fei¹, LI Lin-sen^{1,2}, LIU Duo^{1,2}, LIU Yong-an¹, SHENG Li-zhi¹, ZHAO Bao-sheng¹

(1 State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Xi'an 710119, China)

(2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049 China)

Abstract: An electron gun with multiple focus system was designed, and a smaller beam spot was obtained in the computer simulation technology. The different cathode emission models would be activated when different voltage was load on the grid electrode, and which affects the number of electrons emitted from cathode significantly, the number of electrons would increase and decrease under the Schottky emission and Rejecting-field emission mode. When voltage of focusing electrodes is $U_1 : U_2 : U_3 : U_4 : U_5 = 5 : 8 : 15 : 70 : 100$, the spot size of 160 mm at the distance of 10 m was acquired in the electron gun model.

Key words: Space environment; Electron optics; Computer simulation technology; Multiple focus system; Grid-control electron gun

OCIS Codes: 230.0040; 230.0250; 350.4990; 350.1820; 350.1270

0 引言

人造地球卫星在空间运行时,其所处的空间环境非常复杂,而这种复杂空间环境是地磁场和太阳风磁场在地球附近共同作用的结果.当太阳风粒子接近地球时,磁尾区域的磁场会瞬间增强,空间中的等离子体会在磁场中加速并向地球飞来,这就是我们熟知的磁层亚暴现象^[1].

磁层亚暴发生时,除了大温差($-100^{\circ}\text{C} \sim 100^{\circ}\text{C}$)、

高真空以外($10 \sim 12$ Pa),强光照和高速带电粒子都是空间活动需要考虑的因素^[2].此外,空间中 $5 \sim 30$ keV 带电粒子的束流密度达到 10^{-9} A/cm²,带电粒子对空间飞行器及其内部仪器进行充电^[3],在这种环境下,空间飞行器能否进行有效的通信和运行是其稳定性的一个重要反映.针对这种复杂的空间环境,很多国家都建立了与之相对应的实验室对其进行研究^[4],如美国宇航局建立了飞行器充电诱导介质击穿实验设备和电子束充电实验设备,容器直径为 30 cm,长 1 m,电子能量

基金项目:国家自然科学基金(No. 61471357)、中国科学院“西部之光”和地理信息工程国家重点实验室开放研究基金(No. SKLGIE2014-M-2-1)资助

第一作者:强鹏飞(1987-),男,研究实习员,硕士,主要研究方向为聚焦型探测器. Email: qiangpengfei@opt. ac. cn

通讯作者:赵宝升(1959-),研究员,学士,主要研究方向为脉冲星导航和 X 射线通信. Email: open@opt. ac. cn

收稿日期:2015-10-21; **录用日期:**2016-01-21

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

从 0 eV~30 eV;德国航空和航天研究院实施的亚暴环境模拟项目,容器直径为 2.5 m,电子束斑覆盖直径为 1 m;欧洲空间署的欧洲空间技术模拟设备更加完善,其研究室拥有三个不同直径的真空容器,直径从 1.5 m~2.5 m 不等,容器内部除了设置电子源以外还具备标准太阳模拟源,实验内容涉及到飞行器中靶击穿及解除带电过程研究、反射镜的击穿现象、气象卫星充放电研究、二次电子的发射特性、亚暴环境中电子束的模拟研究等一系列实验^[5],其实验结论表明空间电子环境模拟十分必要,地面验证系统证实地外环境中的电磁辐射不仅会对飞行器的电子设备产生充放电作用,而且会对其内部材料轰击并产生材料缺陷,造成电子设备中的粒子反转作用和单粒子事件。

在模拟磁暴现象的研究中,电子束研究^[6-7]十分重要。目前大部分电子枪的聚焦基本采用一级聚焦的方式,即只有一个聚焦极^[8],该结构的电子枪的焦距比较小,传输距离比较长时,其电子束光斑十分分散。而且电子枪的阴极和阳极结构设计不允许其他射线源穿过其内部,在多源工作情况下,系统多种源只能采取非共轴排列,为了得到长距离情况下较小电子束光斑且多源情况下允许其他源从其内部通过的电子枪,本文设计并模拟了一种多聚焦极结构的电子枪,该电子枪通过多级聚焦原理,在较远距离下得到较小的电子光斑。

1 多聚焦极栅控电子模拟源 CST 模型

多聚焦极电子模拟源采用热阴极电子发射技术。环状热阴极在 2000℃ 左右发射电子,经过聚焦透镜的加速、聚焦以后,在探测器位置形成一定光斑大小的电子源。聚焦系统由 6 个聚焦筒组成,通过在不同聚焦筒上加载不同的聚焦电压来实现电子束的流量控制和聚焦。图 1 为电子束聚焦示意图,从左向右依次有六个不同直径的聚焦筒,分别加载电压 U_g 、 U_1 、 U_2 、 U_3 、 U_4 、 U_5 ,不同电压之间通过分压电阻来分配。栅控电压 U_g 调节电子束流密度,当栅极电压为高电平时,热阴极产生的电子经过多级聚焦系统的聚焦、加速以后从电子枪射出;当栅极电压为低电平时,其低电平所形成的电场对热阴极的电子出射形成阻碍,导致热阴极产生的

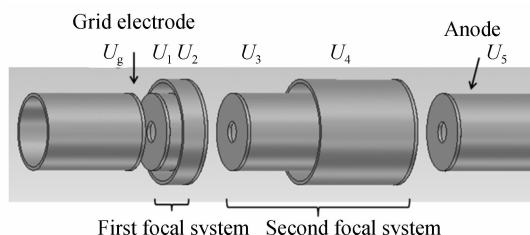


图 1 多聚焦极栅控电子模拟源示意图

Fig. 1 Construction of electron gun with multiple focusing electrode

电子无法穿过栅极而进入多级聚焦系统^[9-10]。通过不同的 $U_1 \sim U_5$ 电压组合控制电子束的聚焦,最终,能量为 $U_5 \times e$ 的电子从电子枪中发射,作用在探测器上。

在电子光学软件 (Computer Simulation Technology, CST) 建模过程中,背景材料为真空,环状电子发射源定义为热阴极电子发射类型,其温度为 2000℃,出射电子为 5424 个,栅极电压 U_g 相对于热阴极电压为 -40 V~10 V 可调,聚焦极相对于热阴极的电压分别为 $U_1 \sim U_5$ 。 U_1 和 U_2 为第一级聚焦系统, U_3 和 U_4 为第二级聚焦系统, U_5 为 5 kV~30 kV 可调, $U_1 : U_2 : U_3 : U_4 : U_5 = 5 : 8 : 15 : 70 : 100$,当 U_5 电压给定时,其他聚焦极的电压也随之确定。所有电极和热阴极中间都有一个直径 10 mm 的孔,该结构允许某些光线通过电子枪中间的圆孔进行无障碍传输,保证了多源系统中多源的轴向排列,提高了探测器多源响应的准确性。

电子枪的束流密度和焦斑面积是电子枪性能的重要指标,在 CST 模拟中,在目标靶位置设置探测器来监测到达目标靶电子的数目和焦斑面积,到达探测器的电子数目越多,即束流密度越大,反之,电子数目越小,束流密度就越小。而探测器上焦斑的大小即为实际电子枪的束流焦斑大小。

在实际使用中电子枪放置在真空管道中,可以认为外界的电磁环境被完全屏蔽,因此,在 CST 求解过程中,设所建模型环境不存在外界磁场,只有静电场,在 x 、 y 、 z 方向将边界条件定为电边界。在进行合理的网格划分以后,定义当求解准确度达到 -30 dB 以后计算停止,运用粒子工作室的粒子轨迹求解器进行求解。

2 仿真计算原理

2.1 电子聚焦原理

电子聚焦采用静电透镜^[11-13]原理,静电透镜对带电粒子的作用类似于光学透镜对光线的作用,当带电粒子通过静电透镜时,由于透镜各部分的电势不同,带电粒子在电场的作用下改变原来的轨迹而进行聚焦或者扩束。静电透镜原理如图 2,当三个电极的电势以低、高、低组合排列时,等势线由中间的高电位向两边的低电位扩散,当电子由左边入射并经过静电透镜时,受到具有纵向分量的电场作用实现电子聚焦^[14-15]。

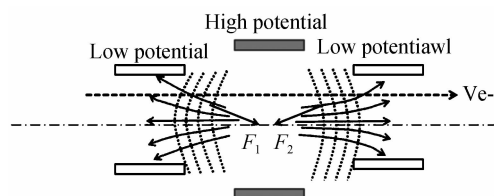


图 2 电子透镜原理

Fig. 2 Principle of electron lens

2.2 栅极控制原理

当热阴极发射电子时,其电子发射模式随着周围电场的变化而改变,并直接影响出射电子数目.对于电子模拟源来说,当栅控电压取正压、零或者负压时,阳极电场渗透作用不变.而电子束流大小之所以发生改变,是因为热阴极电子出射模式随栅控电压的改变而改变^[16].

零场模型:灯丝附近电场为 0,即栅控电压为 0V 时,阴极发射的电流密度为

$$J_0 = AT^2 \exp\left(-\frac{\phi}{KT}\right) \quad (1)$$

式中, A 为常量, T 为阴极温度, ϕ 为逸出功, K 为玻尔兹曼常量

肖特基模型:灯丝表面电场为正(即栅控电压为正),阴极发射的电流密度表示为 J_s .

$$\lg J_s = \lg J_0 + 0.191 \frac{\sqrt{a}}{T} \sqrt{U} \quad (2)$$

式中, J_0 为零场发射模型的电流密度, a 为常量当栅控电压 U 增大时,电子出射密度增大,从而阳极束流增大.

拒斥场作用模型:当灯丝表面加负电场时(即栅控电压为负),阴极发射的电流密度 J_r 为

$$J_r = J_0 \exp\left(\frac{eU'}{K_0 T}\right) \quad (3)$$

式中, J_0 为零场发射模型的电流密度, U' 为阴极和栅极之间的电势差.当 U' 为负值时, J_r 以指数形式递减.当 U' 绝对值较小时,出射的电子数量变少,但是这些少数电子的初动能能够抵抗栅极负场强的作用而运动到栅极外面最终达到阳极,当 U' 绝对值较大时,只有很少量的电子能出射,而且出射后的电子的初动能非常小,不足以冲破栅极负场强的作用运动到栅极的外面,形成截止作用.当栅极电压由正电压向负电压改变时,阴极电子发射模式随外界电场的改变而改变,电子出射数目也随之改变.

3 仿真结果

图 3 为多级电子枪的内部电势分布图,可以看出,在每一级的聚焦系统内部,等势线会向电势比较低的聚焦筒渗透,电子通过电子枪内部时,受力方向总是垂直于等势线并且沿着电场线的反方向,即电子透镜^[17-18]作用,聚焦后在目标靶位置形成较小的电子束斑.

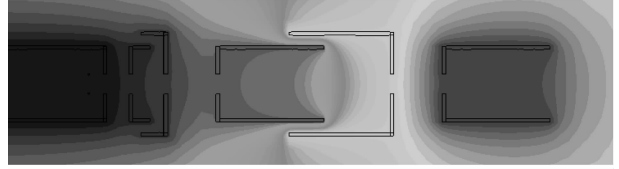


图 3 多聚焦极栅控电子模拟源中的电位线
Fig. 3 Electricfield line in grid-control electron gun with multiple focusing electrode

图 4 为一级聚焦和多级聚焦系统对电子束束斑的影响对比图.对于最终出射能量相同的电子枪系统,如果选用一级聚焦系统,低电位和高电位之间的电势差很大,等势线向低电位的渗透现象非常严重,电子透镜的作用也非常明显,电子在通过这种“高倍”的电子透镜时,由于电子枪的焦距较小,导致在离电子枪较远位置处目标靶上电子束光斑扩散较大.对于多级聚焦系统的电子枪,其中一级聚焦高电位和二级聚焦低电位处于中间电位,二级聚焦系统中的各个聚焦极的等势线渗透并没有一级聚焦聚焦系统严重,可以认为二级聚焦系统是两个一级“低倍”电子透镜的串联.,电子经过这种串联的“低倍”电子透镜后,电子的出射角度变小,从而在远距离目标靶处形成较小的光斑.因此,如果目标靶离电子枪位置较远,采用多级聚焦系统能够获得较小的电子束斑,从而保证在单位面积上获得较多数目的电子.电子光斑大小的仿真模拟结果如图 5,相对于一级电子枪,多聚焦极电子枪的等势线渗透较浅,其电子注的出射角度相对于一级聚焦电子枪较小.

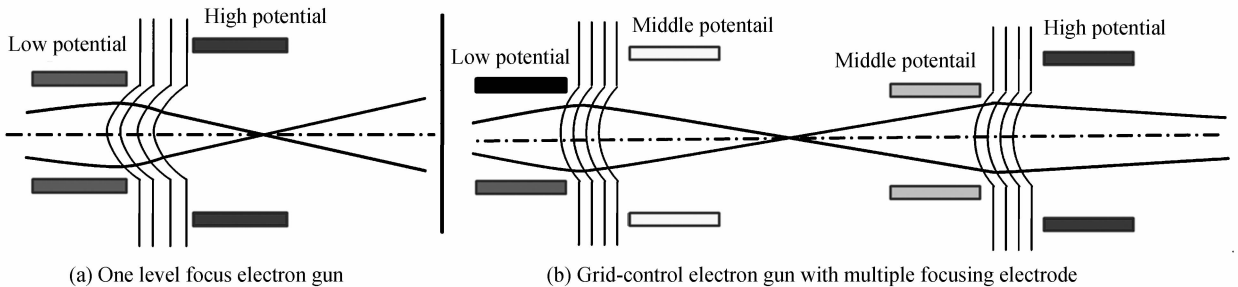


图 4 一级聚焦和多聚焦极栅控电子模拟源的对比
Fig. 4 Comparison of one level focus electron gun and that with multiple focusing electrode

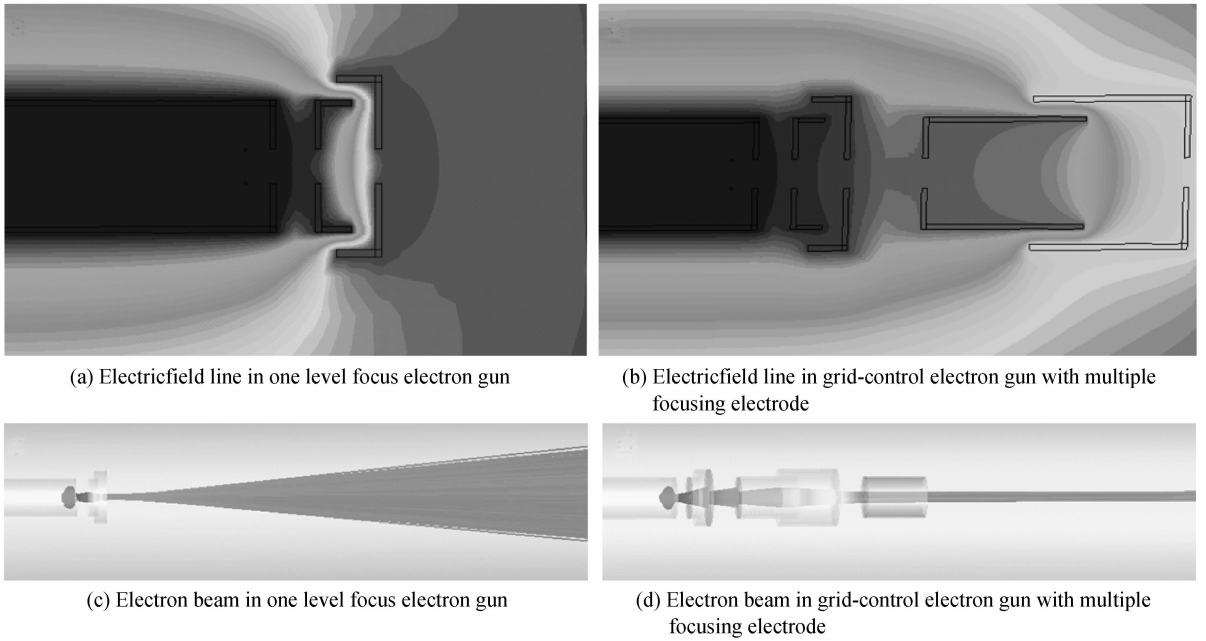


图 5 一级聚焦电子枪电场分布和多聚焦极栅控电子模拟源电场分布和电子注
 Fig. 5 Electricfield lineand electron beam of one level focus electron gun and grid-control electron gun withmultiple focusing electrode

图 6 为阳极高压为 30 kV 时,探测器在电子枪 10 m 处探测到的电子束光斑,其束斑直径约为 160 mm. 图 6 是栅控电压 U_g 为 -5 V、-10 V、-30 V 时探测器上的电子数示意图,可以看出电子数目从最初的 341 个

变为 291 个,最后减少为 168 个. 多级聚焦极电子枪不仅能得到面积相对较小的电子束斑,还能通过不同栅极电压来控制电子输出数目.

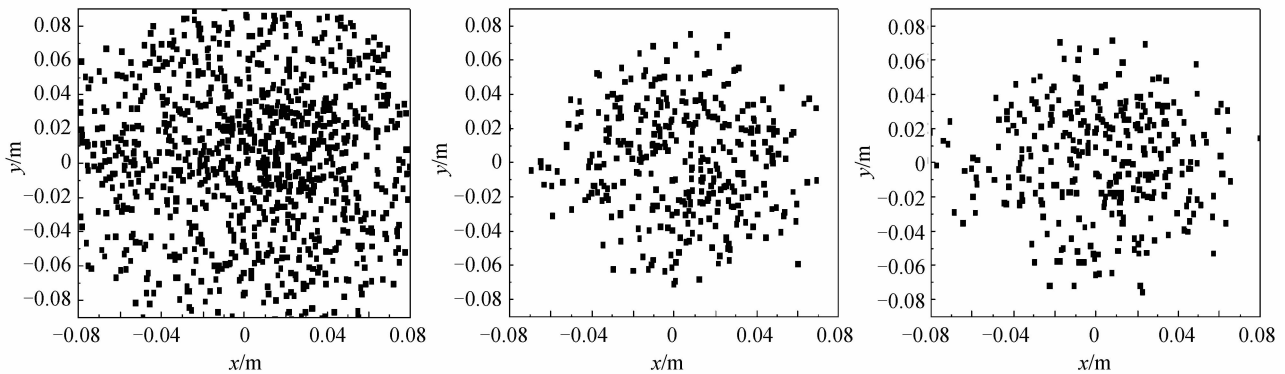


图 6 多聚焦极栅控电子模拟源在 10 m 处的光斑大小

Fig. 6 Electron spot of grid-control electron gun with multiple focusing electrode at the distance of 10 m

栅极电压不同时,阴极电子的发射模型受到影响,当 U_g 为正时,电流密度最高,电子出射也最多,栅极虽然会对电子有一定的吸引,但是总体上大部分电子出射并被加速到阳极. U_g 为负时,电子发射模型变为拒斥场模型,电流密度随之降低;并且,阴极发射出的电子要克服栅极的电场力才能接触到阳极,此时有少量电子能出射并被阳极加速. 当 U_g 为 0 时,电子出射介于中间,栅极对出射后的电子运动不产生任何影响. 图 7 为三种不同电子发射模式下电子模拟源的电子注图和电场分布,可以看出,在三种电子发射模式下,电子

注的出射角和出射方向并没有发生改变,唯一不同是在肖特基发射模式和零场发射模式下,一部分电子被栅极吸收,而拒斥场模式下,电子由于受到电场力作用离开阴极后全部从栅极口飞出. 在肖特基发射模式下阴极电子发射率远远高于零场模式和拒斥场模式,虽然有部分电子被栅极吸收,但是最终探测器接收到的电子还是在肖特基模式下最多. 当栅控电压为正时,电子枪束流最大,栅控电压为负时,束流会变小,电子密度也随之变小,如图 8.

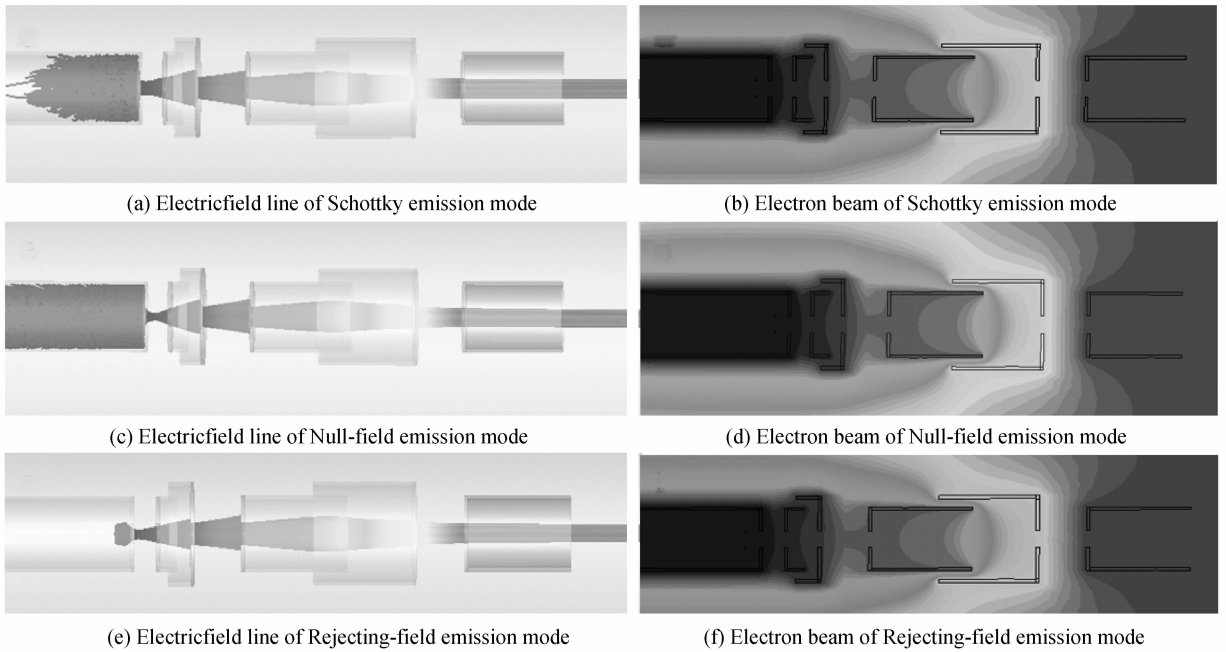


图 7 3 种不同电子发射模式下电子模拟源的电子注图和电场分布

Fig. 7 Electricfield line and electron beam of different emission modes in grid-control electron gun with multiple focusing electrode

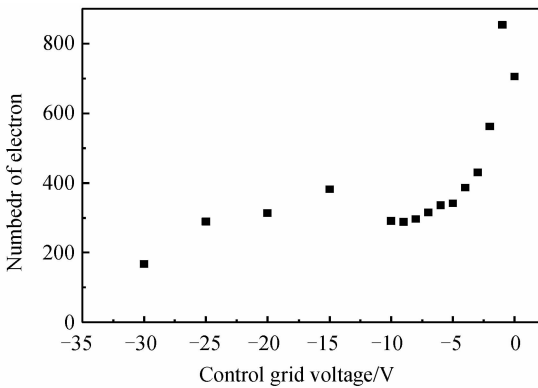


图 8 多聚焦极栅控电子模拟源中栅控电压和出射电子的关系

Fig. 8 Relationship of emitted electron and voltage of grid in electron gun

4 结论

本文在 CST 软件中建立多级聚焦栅控电子枪模型,得到 10 m 处焦斑大小为 $\phi 160$ mm 的电子枪模型,分析了不同栅控电压对电子束流的影响,及电子枪在不同栅控电压下的电子发射模式,为实际工作提供了理论基础。

参考文献

[1] GUO Jun, LU Quan-ming, WANG Shui, *et al.* Two-dimensional particle simulation study of magnetic reconnection [J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2003, **23**(04): 248-255.
郭俊, 陆全明, 王水, 等. 磁场重联的二维粒子模拟研究[J]. *空间科学学报*, 2003, **23**(04):248-255.

[2] QI Yan-wen. Space magnetic environmentsimulationtechnology [J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2005, **22**(01):19-

23.
齐燕文. 空间磁环境模拟技术[J]. *航天器环境工程*, 2005, **22**(01):19-23.

[3] CHEN Yi-feng, YANG Sheng-sheng, LI De-tian, *et al.* Influences of secondary Emission and back scattered electrons on spacecraft surface charge potential[J]. *Modern Applied Physics*, 2014, **5**(03):223-226.
陈益峰, 杨生胜, 李得天, 等. 二次电子和背散射电子发射对卫星表面电位的影响[J]. *现代应用物理*, 2014, **5**(03):223-226.

[4] YE Zong-hai, DU Heng. Space environment research on China [J]. *Acta Geophysica Sinica*, 1997, **40**(S1): 429-441.
叶宗海, 都亨. 中国的空间环境研究[J]. *地球物理学报*, 1997, **40**(S1):429-441.

[5] 郭铸九, 郭彦, 宋佑浩, 等. 电子源及空间模拟真空系统. 真空获得与测量学术交流会[C]. 2004. 中国宜昌.

[6] PU You-lei, LUO Yong. Design of a double anode magnetron inject ion gun for gyro klystronamplifier [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2007, **19**(6): 951-955.
蒲友雷, 罗勇. 回旋速调管双阳极磁控注入电子枪的设计与优化[J]. *强激光与粒子束*, 2007, **19**(6):951-955.

[7] YIN Xue-jun, XIA Jia-wen, LI U Zhen-hao, *et al.* Study of optical property of high current electron gun[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2004, **16**(2): 246-250.
殷学军, 夏佳文, 刘振灏, 等. 强流电子枪电子光学性能的研究 [J]. *强激光与粒子束*, 2004, **16**(2):246-250.

[8] 黄鳌. 皮尔斯电子枪的 PIC 模拟[D]. 成都: 电子科技大学, 2009.

[9] DENG Ning-qin, ZHAO Bao-sheng, SHENG Li-zhi, *et al.* A space audio communication system based on X-ray[J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, **62**(06): 106-112.
邓宁勤, 赵宝升, 盛立志, 等. 基于 X 射线的空间语音通信系统[J]. *物理学报*, 2013, **62**(06):106-112.

[10] MA Xiao-fei, ZHAO Bao-sheng, SHENG Li-zhi, *et al.* Grid-control emission source for space X-ray communication [J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, **63**(16): 81-87.

- 马晓飞, 赵宝升, 盛立志, 等. 用于空间 X 射线通信的栅极控制脉冲发射源研究[J]. 物理学报, 2014, **63**(16):81-87.
- [11] 盛立志. X 射线脉冲星信号模拟源及探测器关键技术研究[D]. 西安:中国科学院研究生院(西安光学精密机械研究所), 2013.
- [12] CHEN Min, ZHAO Bao-sheng, SH ENG Li-zhi, *et al.* Design of a multi-slit streak tube[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(9): 1309-1312.
- 陈敏, 赵宝升, 盛立志, 等. 多狭缝条纹变像管的设计[J]. 光子学报, 2006, **35**(9):1309-1312.
- [13] TIAN Jin-shou, BAI Yong-lin, LIU Bai-yu, *et al.* Design of a femtosecond streak tube[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(12): 1832-1836.
- 田进寿, 白永林, 刘百玉, 等. 飞秒条纹变像管的设计[J]. 光子学报, 2006, **35**(12):1832-1836.
- [14] 李骥. 高性能电子枪的设计与研究[D]. 北京:中国科学技术大学, 2014.
- [15] TIAN Jin-shou, ZHAO Bao-sheng, WU Jian-jun, *et al.* Transfer character of electron pulse in femtosecond diffraction system[J]. *Acta Physica Sinica*, 2007, **56**(1): 123-128.
- 田进寿, 赵宝升, 吴建军, 等. 电子脉冲在飞秒电子衍射系统中的传输特性[J]. 物理学报, 2007, **56**(1):128-128.
- [16] 陶振凯. 15kW/60k 电子枪的研制[D]. 北京:北方工业大学, 2015.
- [17] DEGT Y R, BELOLIPE T, BRYUKH N, *et al.* Femtosecond streak tubes designing, manufacturing and testing[C]. SPIE, 2003, **4948**: 281-290.
- [18] WANG Chao, TANG Tian-tong, KANG Xiao-hui. Analysis on the modulating property of electrostatic immersion objective laminar flow gun[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2008, **20**(3): 513-516.
- 王超, 唐天同, 康晓辉. 阴极透镜层流电子枪调制特性的分析[J]. 强激光与粒子束, 2008, **20**(3):513-516.