

文章编号: 1001-4322(2004)02-0246-05

# 强流电子枪电子光学性能的研究\*

殷学军<sup>1,2</sup>, 夏佳文<sup>1</sup>, 刘振灏<sup>1</sup>, 杨建成<sup>1,2</sup>, 武军霞<sup>1,2</sup>,  
刘伟<sup>1,2</sup>, 夏国兴<sup>1,2</sup>, 刘勇<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院近代物理研究所, 甘肃兰州 730000; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

**摘要:** 利用 SLAC-226 程序对一种工业用大功率电子加速器(450kW)的电子枪光学系统性能进行了研究。计算程序以带电粒子的洛伦兹力运动方程的相对论形式为基础,在充分考虑了空间电荷效应和电子自身产生磁场的情况下编写而成。在该程序中,网格的划分采用正方形网格,解泊松方程采用半迭代切比雪夫法;解轨迹方程采用四阶龙格-库塔法。经过对轴上电位的优化计算,得到了轴上电场的分布,电子轨迹以及阳极孔处的径迹斜率等结果,并且对外加电场与空间电荷场对束流的聚焦作用作了比较分析。计算发现,电子初始角和初始能量(对束流的)聚焦性能影响很小,二极管间距  $d = 58.5\text{mm}$  时对束流聚焦最有利。

**关键词:** 强流电子枪; 电子加速器; 电子光学  
**中图分类号:** TL503 **文献标识码:** A

工业用大功率电子加速器是一种直流高压型加速器,具有效率高,造价低,结构紧凑等特点。在燃煤电站工业废气的脱硫脱硝处理,辐照交联电线电缆绝缘层的改性,工业废水的净化处理,谷物杀菌,材料的涂层固化等工农业生产中有着广泛的应用前景。由于  $\text{LaB}_6$  具有良好的发射特性和较强的抗中毒性能,所以目前许多电子枪采用它作为阴极材料。我们也根据实际情况,将  $\text{LaB}_6$  作为电子枪的发射材料。

## 1 计算条件

### 1.1 边界条件

电子发射系统采用的是六硼化镧( $\text{LaB}_6$ )平面阴极<sup>[1,2]</sup>,计算边界条件如图1所示,计算参量见表1,阴极电位  $V = 0$ 。

表1 边界条件  
Table 1 Computing condition

radius of cathode	spacing of cathode and anode	potential of anode	E-beam	high energy
$r/\text{mm}$	$d/\text{mm}$	$U_a/\text{kV}$	$I/\text{mA}$	$E/\text{MeV}$
7.5	59.5	36.38	300.0	1.5

### 1.2 假定条件

计算是在以下假定条件下进行的(1)电子枪的电压波动很小,可以忽略不计,认为是稳定的直流(2)由于加速管上安装有内嵌矽钢片的铜环来屏蔽外界的电场,因此在计算时,仅考虑由分压电阻而产生的静电场,不考虑其它外场的影响(3)加速管中的真空度好,对于二次粒子的影响也可以忽略。

计算条件(1)高斯型电流密度分布(2)初始能量为  $1\text{eV}$ (3)运动方向与  $z$  轴一致。

## 2 电子枪光学性能的计算

### 2.1 轴上电位分布

在这种加速器的光学系统中,由于加速器本身没有

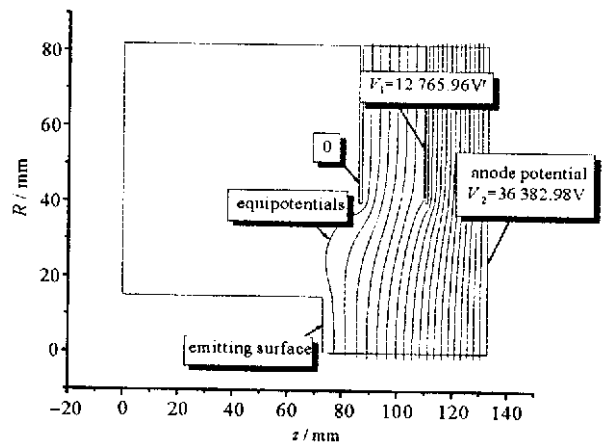


Fig. 1 Boundary condition

图1 边界条件

\* 收稿日期 2003-07-02; 修订日期 2003-09-08  
基金项目 国家自然科学基金资助课题(10075066)  
作者简介 殷学军(1972—),男,博士研究生,主要从事束流物理研究;兰州市31号信箱 yinxuejun@hotmail.com。

专门的预聚焦系统,电子束的聚焦完全是靠加速管前面部分的非均匀场来实现。

电子加速器的电子枪直接处于加速管内,而静电透镜单元由圆孔膜片构成。由于物镜(阴极)直接浸没在加速管变梯度部分所形成的透镜场内,因而可以把它们看作一个浸没物镜。圆孔膜片轴上电位分布满足

$$V_i(z) = V_{i0} - \frac{E_{i1} - E_{i2}}{2}z + \frac{R}{\pi} \left( \frac{z}{R} \arctan \frac{z}{R} + 1 \right) \tag{1}$$

而在圆孔膜片中心有

$$r = z = 0, V_{i0}(0) = V_i + (E_{i1} - E_{i2})R/\pi \tag{2}$$

式中:  $V_i, V_{i0}$  分别代表第  $i$  个圆孔膜片的电位和轴上电位,  $E_{i1}, E_{i2}$  分别代表第  $i$  个圆孔膜片左右两侧的电场。

图 2, 3, 4 分别为平面二极管和整个加速器光学系统的轴上电位和电场的分布。从图 2, 3 中可以看出, 电子枪内的轴上电位分布符合有空间电荷情况下的无限大平面二极管间的 Child 定律。沿  $z$  轴方向, 轴上加速电位和电场迅速增加, 并且电场梯度始终大于零 ( $\nabla E > 0$ )。这意味着在电子枪内, 外加电场对束流主要起聚焦作用, 这也正是设计好光学系统的关键。从图 4 中可以看到, 在整个加速器光学系统中, 加速电压几乎是随  $z$  轴方向线性增加的, 而外加电场可以分为不等梯度场和等梯度场两个部分: 第一部分不仅对电子具有加速作用, 而且还要完成聚焦任务; 在第二部分, 外加电场只对电子进行加速。

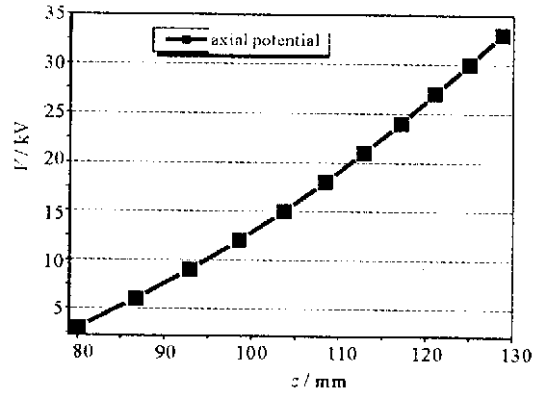


Fig. 2 Distribution of axial potential of diode  
图 2 平面二极管轴上电位分布

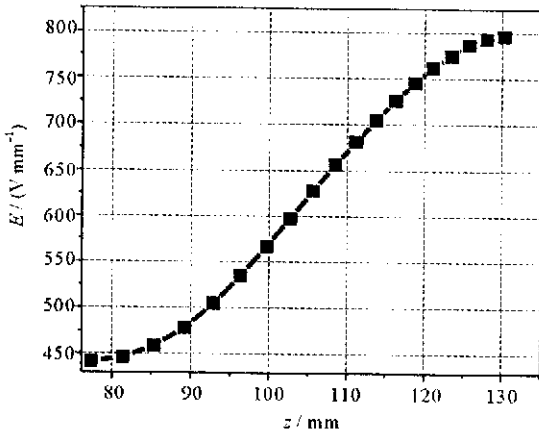


Fig. 3 Distribution of axial electric field and field gradient of diode

图 3 平面二极管轴上电场分布和电场梯度

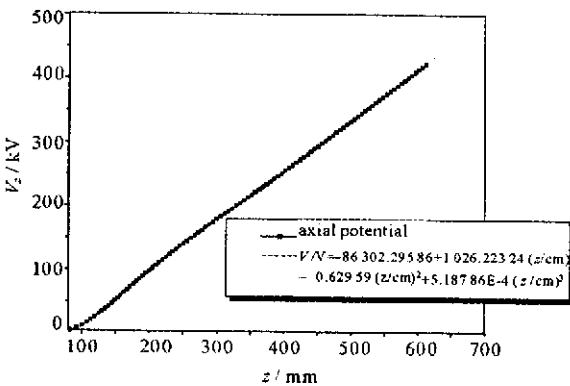
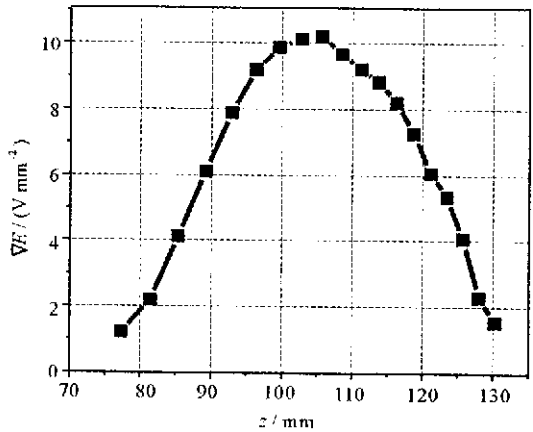
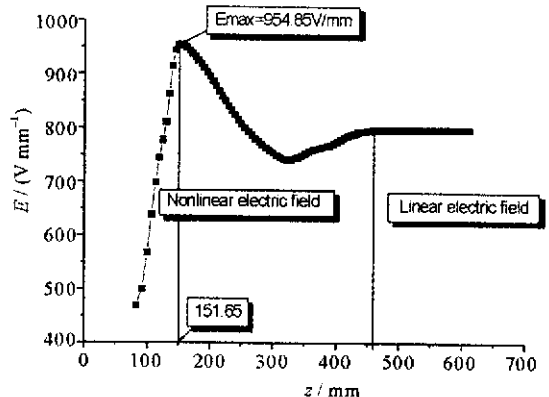


Fig. 4 Distribution of axial potential and fields of accelerator tube

图 4 加速器光学系统的轴上电位和电场分布



## 2.2 电子轨迹计算

根据带电粒子在电磁场中的洛伦兹力公式  $\chi(mv)/dt = -e(E + v \times B)$ , 经过运算得到三个方向的运动方

程<sup>[4]</sup>

$$\text{轴向: } Z = \alpha(1 - \beta^2)^{1/2}[-E_z(1 - Z^2) + ZRE_r + ZAE_\varphi - cRB_\varphi + cAB_r] \quad (3)$$

$$\text{径向: } R = \alpha(1 - \beta^2)^{1/2}[-E_r(1 - R^2) + ZRE_z + RAE_\varphi + cZB_\varphi - cAB_z] + A^2/R \quad (4)$$

$$\text{角向: } A = \alpha(1 - \beta^2)^{1/2}[-E_\varphi(1 - A^2) + ZAE_z + RAE_r - cZB_r - cRB_r] - RA/R \quad (5)$$

式中:  $\beta^2 = Z^2 + R^2 + A^2$ ,  $\beta = v/c$ 。采用四阶龙格-库塔法求解二阶微分方程得到电子轨迹。

### 2.3 出射斜率的计算

从电子束出射斜率来看,如图 5(a)所示,在阳极孔处出射斜率小于零,这说明此时阳极孔透镜的会聚作用大于空间电荷效应的发散作用<sup>[6]</sup>,电子束在此处呈汇聚状,由于加速管后面的部分没有聚焦功能,斜率小于零有利于电子束能顺利地通过加速管;在加速管出口处,如图 5(b)所示,电子束出射斜率几乎都在零的附近,这意味着此时的束流分布近似于层流。图 6 表示了电子的轨迹,第一组表示在阳极孔附近的电子轨迹,第二组表示电子通过阳极孔以后的轨迹,第三组表示整个加速管内部的电子轨迹,前两组说明了阳极孔对电子有聚焦作用。由图 6 还可以看出,层流束的半径比阴极半径稍小,这是电子束缓慢聚焦的结果。这个结果非常重要,因为根据设计,在加速管的后面接有一段聚焦螺线管,在螺线管中,层流束的传输是比较理想的情况。

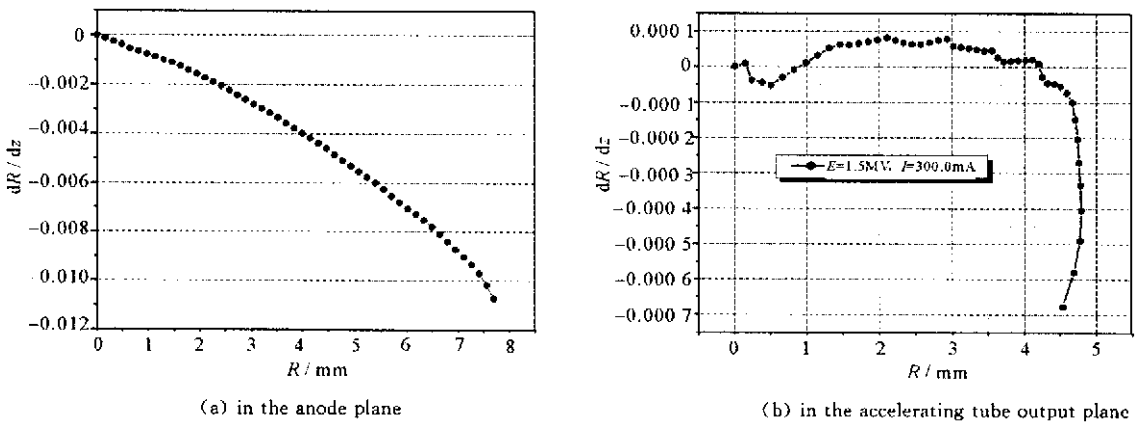


Fig.5 Trace-space plot of rays

图 5 各轨迹的径向大小及出射斜率

### 2.4 静电加速场的聚焦作用

在静电加速管电场中,电子的径向运动方程为<sup>[6]</sup>

$$r'' + \frac{U'}{2U}r' + \frac{1}{4U}(U'' + \frac{\rho}{\epsilon_0})r = 0 \quad (\rho < 0) \quad (6)$$

式中  $r, z$  分别为电子的径向和轴向坐标,  $U$  为静电加速管中轴上电压,  $\rho$  为空间电荷密度,  $\epsilon_0$  为真空介电常数。要使电场的会聚作用大于空间电荷场的发散作用,则必须

$$U'' > -\rho/\epsilon_0 \quad (7)$$

从图 7(a)可以看出,在电子枪内,可以分为两个区域(1)  $U'' < -\rho/\epsilon_0$ ,说明空间电荷场的发散作用大于外加电场的聚焦作用,这对于束流的顺利引出是十分必要的(2)  $U'' \geq -\rho/\epsilon_0$ ,在此区域中,外加电场的聚焦作用对束流起主要影响,这样有利于束流顺利通过阳极孔。加速器的整个光学系统沿轴向也可以分为三个区域(图 7(b))(1)  $U'' \geq -\rho/\epsilon_0$ ,说明外加电场的聚焦作用大于空间电荷场的发散作用,这对于束流的引出和顺利通过阳极孔是十分有利的(2)  $U'' < -\rho/\epsilon_0$ ,在此区域中,空间电荷场的发散作用对束流起主要影响,这对防止束流过焦是必要的(3)  $U'' \approx -\rho/\epsilon_0$ ,这一区域中,外电场的聚焦作用与空间电荷场的发散作用基本抵消,束流在径向保持不变。虽然第(1)(2)区域的长度只占总长度的 1/5,但是这两区域对于强流电子束的引出和聚焦起着关键性的作用。

### 2.5 电子初始运动方向(初始角)的影响

前面的计算都是在电子束的初始运动方向与  $z$  轴一致的情况下进行的,我们也对电子束的初始角取其它值进行了计算,结果表明,它对电子束聚焦性能的影响很小。

### 2.6 电子初始能量的影响

在以上计算中,电子束初始能量均为 1eV。当初始能量取其它值时(在每次计算中,电子束都取 1eV 左右的不同值进行计算)结果发现其影响也很小。

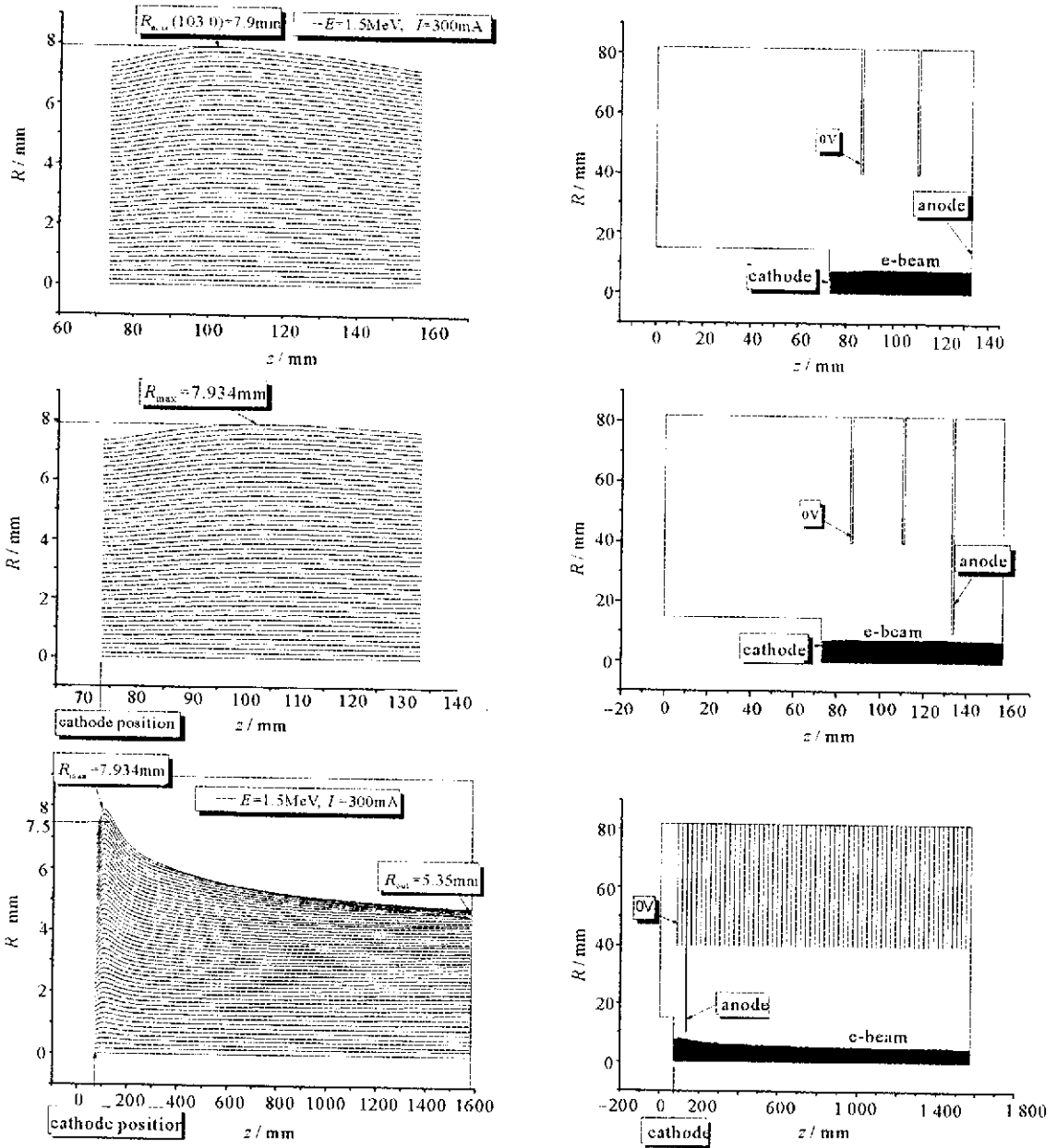


Fig. 6 Trajectory of electron

图 6 电子轨迹图

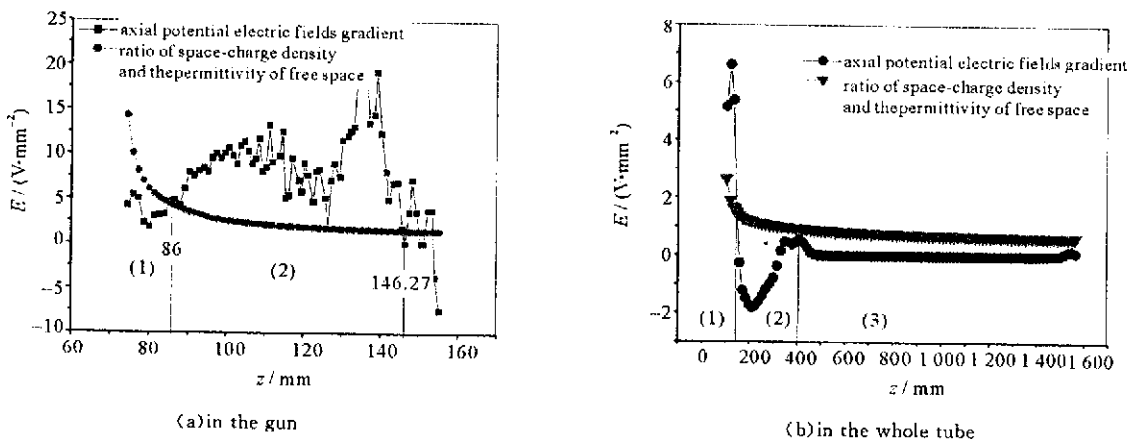


Fig. 7 Focusing effect is greater than the space charge divergence effect at the anode hole

图 7 阳极孔处电场会聚作用大于空间电荷效应的发散作用

### 2.7 二极管间距对聚焦的影响

我们还对二极管间距  $d$  对聚焦性能的影响作了研究,计算表明二极管间距对聚焦性能有一定影响,如图 8 所示。可以看出,存在一个最佳间距,  $d = 58.5\text{mm}$ ,但这与文献 [2] 的结论并不矛盾,后者只是在一个较小范围内讨论。

### 3 结束语

通过以上的分析和计算,得到了强流电子枪内部的电位和电场分布,电子轨迹以及束流在阳极孔处的径迹斜率结果,还分析了外加电场与空间电荷场对束流聚焦的影响。经计算证明,所设计的强流电子枪在光学性能方面可以较好地满足工作的需要。

### 参考文献:

- [1] 殷学军,刘振灏,陈思富. 大功率电子加速器光学性能的研究[J]. 高能物理与核物理, 2002, 26(5): 537—542. (Yin X J, Liu Z H, Chen S F. Study on the electron optics property of high-power electron accelerator. *High Energy Physics and Nuclear Physics* 2002, 26(5): 537—542)
- [2] 陈思富,殷学军,刘振灏,等. ELV-8 型加速器电子光学性能研究[J]. 强激光与粒子束, 2001, 13(4): 513—516. (Chen S F, Yin X J, Liu Z H, et al. Study of the electron optics property of ELV-8 electron accelerator. *High Power Laser and Particle Beams* 2001, 13(4): 513—516)
- [3] Humphries S Jr. Charged Particles Beams[M]. New York: Wiley & Sons Press, 1990.
- [4] Herrmannsfeldt W B. Electron Trajectory Program[M]. USA: Stanford University, 1979.
- [5] Steffen K G. High Energy Beam Optics[M]. New York: Wiley & Sons Press, 1965.
- [6] 郁庆长. 计算高压型强流离子加速器束流光学系统的传输矩阵法[J]. 原子核物理, 1982, 4(3): 249—256. (Yu Q C. Transfer matrix method for the computation of beam optical systems of high voltage type high current ion accelerator. *Chinese Journal of Nuclear Physics*. 1982, 4(3): 249—256)

## Study an optical property of high current electron gun

YIN Xue-Jun<sup>1,2</sup>, XIA Jia-Wen<sup>1</sup>, LIU Zhen-Hao<sup>1</sup>, YANG Jian-Cheng<sup>1,2</sup>, WU Jun-Xia<sup>1,2</sup>,  
LIU Wei<sup>1,2</sup>, XIA Guo-Xing<sup>1,2</sup>, LIU Yong<sup>1,2</sup>

(1. Institute of Modern Physics, the Chinese Academy of Sciences, P. O. Box 31, Lanzhou 730000, China;

2. Graduate School, the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

**Abstract:** Electron optics property of a high-power electron accelerator (450kW) using the SLAC-226 program was studied in this paper. Some results such as the potential distribution in the gun, the trace-space plot of ray in anode plane, the impact on beam focusing caused by the spacing of diode were obtained. Through calculating, the best distance between anode and cathode is about 58.5mm. And some analysis of space-charge effects were also presented.

**Key words:** High current electron gun; Electron accelerator; Electron optics

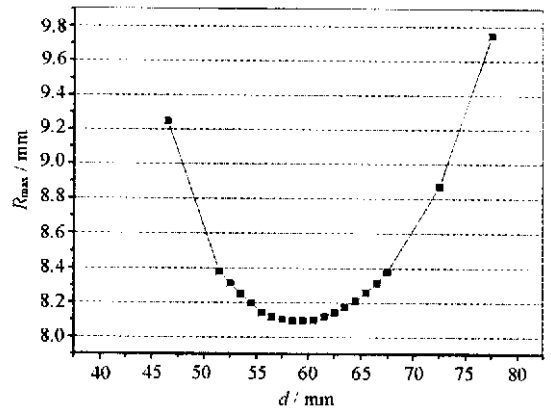


Fig. 8 Focusing property of beam effected by the spacing of cathode and anode

图 8 二极管间距对聚焦的影响