

高电流密度圆柱状电子光学系统设计*

孙富宇[†] 吴振华 张开春

(电子科技大学物理电子学院太赫兹研究中心, 成都 610054)

(2009 年 5 月 3 日收到; 2009 年 7 月 7 日收到修改稿)

设计了高电流密度圆柱状电子枪, 并分析了枪体参数对电子注品质的影响; 运用径向力平衡理论计算了聚焦磁场. 三维模拟软件 CST PARTICLE STUDIO 模拟显示, 在枪体电极和空间电荷形成的静电场, 以及聚焦磁场作用下, 电子呈角向先变速后匀速螺旋状运动, 其旋转半径始终与出射阴极面时的半径相同, 从而在枪区和相互作用通道内维持了注包络水平. 模拟结果与设计理论相符. 注平均电流密度达到 24.4 A/cm^2 , 层流性良好, 填充因子 76.7%, 流通率 100%.

关键词: 电子枪, 聚焦磁场, 电子光学系统, 注包络

PACC: 4180, 4180D

1. 引 言

太赫兹辐射源的研制是太赫兹科研中面临的首要问题, 已成为国际研究热点之一^[1-3], 基于真空电子学的太赫兹辐射源——扩展相互作用振荡器 (extended interaction oscillator, EIO)^[4,5] 在 0.1—0.5 THz 频段相比同类器件具有高功率、重量轻、体积小等优势. 电子科技大学太赫兹研究中心在国内率先开展了 EIO 实际器件的研制, EIO 需要的高品质电子注 (注电流密度高、注包络水平, 以及注层流性良好等) 成为其发展和研究的关键. 随着工作频率的提高, 器件尺寸更小, 用于注波相互作用的电子注尺寸, 以及注外层电子与相互作用通道内壁的间隙都相应缩小, 而对注电流密度的要求却逐渐增加^[6,7]. 渐小的注尺寸和渐高的电流密度, 使电子注空间电荷效应越发明显, 因此在电子光学系统中要实现高电流密度电子注的水平传播, 以避免电子轰击通道内壁, 无疑增加了电子枪和聚焦磁场的设计难度. 本文根据研究中心 EIO 课题组的实际需求, 研究并设计了某 EIO 高电流密度圆柱状电子光学系统.

电子光学系统设计主要包括两个部分: 一是枪体结构的设计. 一般而言, 枪体结构参数越多, 计算优化越繁复, 因此应在保证电子注品质的前提下, 尽可能地使结构模型简单化. 二是聚焦磁场的设

计. 不考虑聚焦磁场时, 空间电荷效应及枪体电极引起的注内部径向电场 ($E_r \neq 0$) 使电子注包络逐渐扩张, 电子将轰击通道内壁, 磁场的作用便在于维持注包络形状. Bemis 等提出了一种新的平衡注径向力的理论^[8]: 在电子枪总体设计完成后, 借助三维模拟软件 OMNITRAK 获取沿注传播方向变化的径向电场值, 再通过公式计算出平衡注径向力所需磁场值, 在电子光学系统中加入该磁场, 理论上便可完全抵消 $E_r \neq 0$ 引起的注横向脉动, 使电子注包络维持水平. 本文首先给出枪体结构, 通过只调节四个坐标点位置得到符合要求的电子枪, 最后运用 Bemis 等提出的方法, 设计出完整的高电流密度圆柱状电子光学系统.

2. 圆柱状电子枪设计

2.1. 电子枪结构

EIO 实验中电子枪阴极半径 $r_b = 1.15 \text{ mm}$, 要求阴阳极压差 $V_{AK} = 15 \text{ kV}$ 时, 获得注电流密度 $J \geq 20 \text{ A/cm}^2$. 首先, 建立如图 1 所示的枪体结构, 包括圆盘平板阴极、皮尔斯聚焦极、阳极以及相互作用通道, 其中, 阴极接 -15 kV 高压、聚焦极与阴极同电位、相互作用通道半径 1.5 mm, 与阳极相连且接地. 在

* 国家重大基础研究发展计划 (973) 项目 (批准号: 2007CB310401) 资助的课题.

[†] E-mail: fysun@uestc.edu.cn

电子枪实际工作状态下,其阴极侧面包裹有厚度为 0.2 mm 的钨筒,由于注尺寸很小,设计中细微偏差都可能对结果产生严重影响,因此钨筒厚度须考虑在内.圆柱状电子枪属轴对称结构,各参量仅与纵向分量 z (电子注传播方向) 和径向分量 r 相关,为便于分析,取枪体 1/2 截面并建立柱坐标系如图 2,其中圆盘阴极中心为坐标原点 $O(0,0)$,聚焦极近轴点 $P_1(z-p_1, r-p_1)$,远轴点 $P_2(z-p_2, r-p_2)$,聚焦极角度 α ,以及阳极头位置 $P_3(z-p_3, r-p_3)$ 和 $P_4(z-p_4, r-p_3)$.出于可靠性考虑,电子枪设计中通常要避免“尖端”的存在,为此对近轴点 P_1 和阳极头 P_3 处倒圆角,半径分别为 0.1 mm 和 0.6 mm.

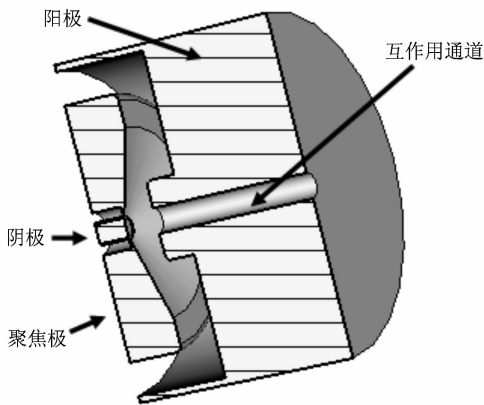


图 1 电子枪结构模型

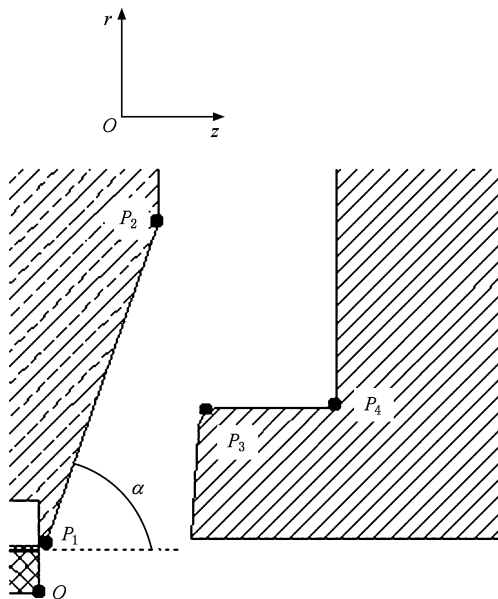


图 2 柱坐标系中电子枪 1/2 截面图

2.2. 电子枪参数

圆柱状电子枪设计中最为关键的是聚焦极形

状的确定,皮尔斯在假定注内电荷密度沿注横向截面均匀分布, $E_r = E_\theta = 0$ 且不考虑真空击穿现象对电极造成约束的前提下,从理论上推导出近注边缘处 $\alpha = 67.5^\circ$ ^[9,10].然而实际应用中具有有限面积的阴极,产生的电子注在截面上径向电场 $E_r \neq 0$,尤其对于高电流密度电子注,其内部空间电荷效应越发明显,导致了边界条件的复杂性,此时真空击穿现象也须考虑在内.事实上这种情况下目前仍未得到注内电位(或电场)分布的解析解^[11],从而难以准确得到聚焦极的形状,只能借助软件优化结构参数.

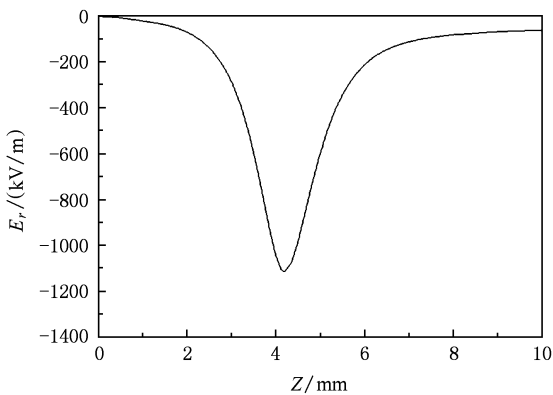
文中利用三维模拟软件 CST PARTICLE STUDIO^[12]进行了电子枪的设计,粒子发射模型为空间电荷限制发射,阴极面网格 $\Delta r = 0.05$ mm. P_1 距离阴极面最近,对阴极表面电场影响最大,从而严重影响电流大小; P_2 与聚焦极角度 α 则决定枪区和阳孔处电子注包络的整体形状; P_3 与 P_4 的坐标主要取决于聚焦极形状,最终保证避免发生真空击穿.设计中首先基本确定 P_1 的位置, P_1 越靠近阴极面则显然阴极表面场强越强,得到电流也越大,然而却使注包络趋于扩张,横向速度增大(指向注外),不利于聚焦(需要加大磁场,增加聚焦系统重量),反之若越远离阴极面,阴极表面场强越小,得到电流越小,注包络趋于收敛,横向速度增大(指向注内),同样不利于聚焦;其次调整 α 与 P_2 , α 越大(通常大于 67.5°)枪区注包络越趋于扩张,越小注包络越趋于收敛.在 α 保持不变的情况下, P_2 越大则阳孔处注越趋于收敛,越小注包络越趋于扩张;最后通过调节 P_3 与 P_4 的位置,以保证一定真空度下阴阳极压差所能承受的最小距离.依照以上原则反复调节参数,使注包络仅在静电场作用下保持水平,实现电子从阴极表面到阳孔之间的水平渡越.优化得到聚焦极角度 $\alpha = 72.65^\circ$,枪体其他参数如表 1 示,输入数据并测得 $r = r_{rms} = 0.813$ mm 处径向电场值如图 3 示.该电场图为枪区和相互作用通道前端(阳孔附近)各电极与空间电荷共同作用形成的径向电场,阴极面处其值为零,在 $z = 4.2$ mm 处达到最大.进入作用区后径向电场逐渐减弱,最终接近为一很小常数值 E_{const} ,便是单独的空间电荷径向电场(因为在相互作用通道远处,电极电场已不起作用).由于同为径向无脉动聚焦方式,因此可通过施加足够大纵向磁场(100T)来评估通道内均匀磁场

区的径向电场, 得 $E_{\text{const}} = -146.4 \text{ kV/m}$. 电子枪注轨迹如图 4 示, 空间电荷限制电流 $I = 1.013 \text{ A}$, 由静电稳态流连续性方程 $\nabla \cdot \mathbf{J} = 0$ 知电流密度沿纵向无变化, 因此得到注平均电流密度 $J = I/\pi r_b^2 = 24.4 \text{ A/cm}^2$.

表 1 高电流密度电子枪参数

参数	值/mm
d_{AK}	4.1
d_{AF}	3.1
$Z-P_1$	0.112
$Z-P_2$	3.2
$R-P_3$	4.7
$Z-P_4$	8

注: 1. d_{AK} 为阴阳极间最小距离; 2. d_{AF} 为阳极与聚焦极间最小距离.

图 3 半径 $r = r_{\text{ms}}$ 处径向电场值

3. 磁场计算

3.1. 聚焦理论

在第二部分圆柱状电子枪设计中, 电子注在静电场作用下实现了枪区的水平渡越, 但在相互作用通道内, 电子注由于受到空间电荷斥力逐渐发散而轰击通道内壁(图 4), 因此必须设计聚焦系统以维持通道内注包络同样水平. 本文采用螺线管聚焦磁场, 通过磁场力平衡电子径向受力, 理论上可实现电子注的无脉动, 即注包络水平.

在非相对论情况下, 只需研究静电场与外磁场对粒子的作用, 为此在图 2 柱坐标系中研究电子受力情况. 由于是轴对称结构, $B_\theta = 0$, 磁矢量 $A_z = A_r =$

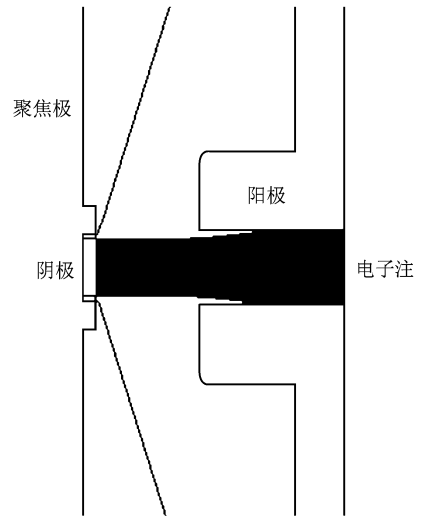


图 4 电子枪中电子注轨迹图

0, 因此有

$$\mathbf{B} = \mathbf{e}_z \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (rA_\theta) - \mathbf{e}_r \frac{\partial A_\theta}{\partial z}. \quad (1)$$

在 EIO 电子光学系统中, 注半径已非常小, 便有以下合理近似^[8]:

$$A_\theta(z, r) = \frac{r}{2} B_z(z, 0), \quad (2)$$

把(2)式代入(1)式可求得

$$B_z(z, r) = B_z(z, 0), \quad (3)$$

$$B_r(z, r) = -\frac{r}{2} \frac{\partial B_z(z, 0)}{\partial z}. \quad (4)$$

由(4)式知电子将受到角向力 $F_\theta = -ev_z B_r$, 产生角向加速度 a_θ , 注意到电子出射阴极面时 $v_r(0, r) = 0$, 从而不难求得任意位置处的电子角向速度 v_θ 为

$$\begin{aligned} v_\theta &= \int_0^t a_\theta d\tau = \frac{er}{2m} \int_0^t v_\tau \frac{\partial B_z}{\partial z} d\tau \\ &= \frac{er}{2m} [B_z(z, 0) - B_z(0, 0)] t, \end{aligned} \quad (5)$$

将(3)式与边界条件 $B_z(0, 0) = 0$ 代入(5)式可求得

$$v_\theta(z, r) = \frac{e}{2m} B_z(z, 0) r. \quad (6)$$

若要保持电子注包络水平, 即要求径向加速度 $a_r = 0$, 此时有径向力平衡公式

$$\begin{aligned} -\frac{eE_r(z, r)}{m} + \frac{-ev_\theta(z, r)B_z(z, 0)}{m} \\ + \frac{mv_\theta^2(z, r)}{mr} = 0. \end{aligned} \quad (7)$$

将(6)式代入(7)式有

$$-\frac{4E_r m}{re} = B_z^2(z, 0). \quad (8)$$

以上各式中, $-e$ 与 m 分别为电子电量与质量, E_r 为枪体电极与空间电荷形成的径向电场之和.

从(7)式可知, 对于任意固定半径 r 上的电子, 在电子光学系统中输入磁场值 B_z , 则可提供“合适”的角向力 $-ev_z B_r$ 和径向会聚力 $-ev_\theta B_z$, 使电子径向受力平衡. 前者促使电子产生变化的角向速度 v_θ , 后者与 $-eE_r(z, r)$ 一起恰好形成了促使电子以 v_θ 绕固定半径 r 旋转的变化向心力, 也即, 该层电子在沿整个传播方向运动过程中实现了径向力的精确平衡, 无横向波动. 特别地, 当电子进入相互作用通道内的均匀磁场区后, 其受到角向力和电极径向电场力为零, 角向速度不再变化, 恒定的径向会聚力与空间电荷径向电场力提供了恒定的向心力, 电子仍无脉动传播, 从而在整个相互作用通道内维持注包络水平.

3. 2. 模拟结果

文中 2. 2 节给出了枪区以及相互作用通道前端半径 rms (root - mean - square) 处的径向电场 E_r (图 3), 将该数据代入(8)式便得到 $r = r_{rms}$ 处平衡径向力所需磁场值如图 5 示, 阴极面处其值为 0, 在 $z = 4.2 \text{ mm}$ 处达到最大(0.177T). 通过该磁场聚焦显然有 $r = r_{rms}$ 处电子径向受力得到精确平衡, 完全没有径向速度和加速度, 而在其他半径处接近平衡, 注轨迹如图 6 示, 可见注包络已极接近水平.

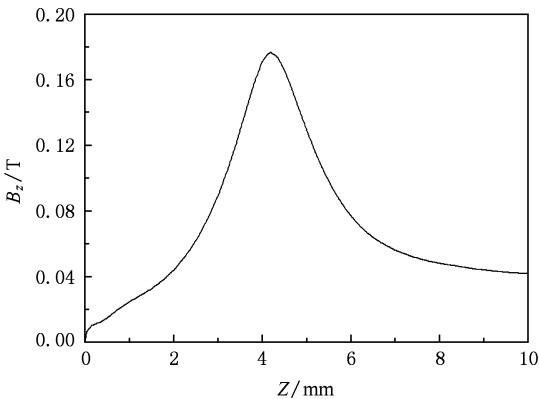


图 5 半径 $r = r_{rms}$ 处平衡径向力所需磁场值

为得到完全水平包络, 可选择加大磁场比例系数 f_B 的方法, 此时实际磁场为 $f_B \times B_z|_{r=r_{rms}}$, 合理范围为 $1 \leq f_B \leq 1.04$. 又由 E_{const} 可计算得到通道内均匀

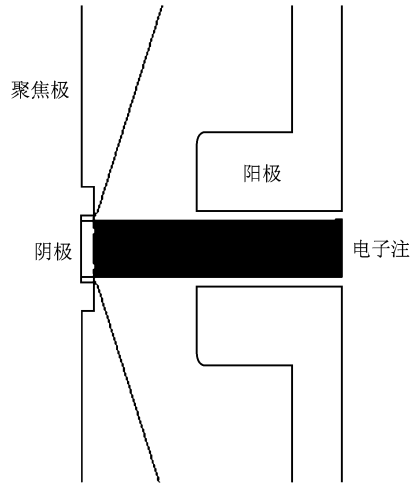


图 6 枪区和通道前端电子注轨迹图

磁场区的聚焦磁场 $B_{const} = 0.064 \text{ T}$, 当 $f_B = 1.03$ 时, 在图 5 磁场和 B_{const} 聚焦下 EIO 电子光学系统完整注轨迹(相互作用通道长度约 40 mm)如图 7 示, 同时取 $Z = 8.6 \text{ mm}$ 处注横向截面分布如图 8 示, 从以上两图可见电子在枪区和相互作用通道前端(阳孔附近)以变角向速度绕轴旋转, 在均匀磁场区以恒定角向速度绕轴旋转, 整个传播过程中保持旋转半径不变, 轨迹无交叉, 层流性良好, 电子注包络维持水平.



图 7 电子光学系统中电子注轨迹图

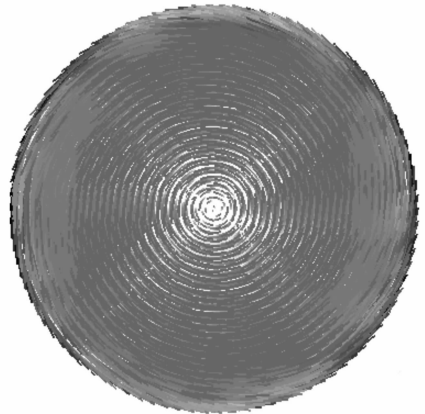


图 8 $Z = 8.6 \text{ mm}$ 处注横向分布图

4. 结 论

设计了 EIO 电子光学系统. 首先, 在保证避免发生真空击穿的前提下完成了高电流密度圆柱状电子枪的设计; 之后运用径向力平衡理论计算了维持注包络水平所需的聚焦磁场. 文中所用方法具有的主要优点在于: 1) 与周期磁场聚焦方式相比, 具有注径向无脉动的优点, 这对于小注尺寸的真空电子器件尤为重要; 2) 由于均匀磁场通常由永磁体以

及长螺线管中部产生, 磁聚焦系统过于笨重, 因此与无脉动的均匀磁场聚焦方式相比, 此方法有利于减小器件体积和重量. 高电流密度圆柱状电子光学系统设计需借助三维模拟软件, 模拟显示电子围绕固定半径(出射阴极面时的半径)沿传播方向呈角向先变速后匀速螺旋状运动, 而注包络始终维持水平, 如图 7 和 8 所示. 模拟结果与设计理论相符. 注平均电流密度达到 24.4 A/cm^2 , 层流性良好, 填充因子 76.7% , 注流通率 100% .

- [1] Liu S G 2006 *China Basic Science* **8** 7 (in Chinese) [刘盛纲 2006 中国基础科学 **8** 7]
- [2] Siegel P H 2002 *IEEE Trans. Microwave Theory. Tech.* **50** 910
- [3] Wang M H, Xue Q Z, Liu P K 2008 *Journal of Electronics & Information Technology* **30** 1766 (in Chinese) [王明红、薛谦忠、刘濮鲲 2008 电子与信息学报 **30** 1766]
- [4] Zhang K C, Wu Z H, Liu S G 2008 *IEEE 33rd International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves* p1
- [5] Zhang K C, Wu Z H, Liu S G 2008 *Chin. Phys. B* **17** 3402
- [6] Srivastava A 2007 *IEEE Vacuum Electronics Conference* p1

- [7] Booske J H 2008 *Phys. Plasmas* **15** 055502
- [8] Bemis T, Bhatt R, Chen C 2007 *Appl. Phys. Lett.* **91** 201504
- [9] Pierce J R 1940 *J. Appl. Phys.* **11** 552
- [10] Nagy G A, Szilagyi M 1983 *Introduction To The Theory of Space-Charge-Optics*(Beijing: Science Press) p125 (in Chinese) [G. A. 纳吉、M. 西拉支 1983 空间电荷光学导论(北京:科学出版社)第 125 页]
- [11] Tang X Y, Shukla P K 2008 *Phys. Plasmas* **15** 023702
- [12] Balk M C 2008 *IEEE Vacuum Electronics Conference* p459

Design of a high current density cylindrical electron optics system*

Sun Fu-Yu[†] Wu Zhen-Hua Zhang Kai-Chun

(THz Research Center, School of Physical Electronics, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

(Received 3 May 2009; revised manuscript received 7 July 2009)

Abstract

A high current density cylindrical electron optics system is designed for extended interaction oscillator, including the design of electron gun and focusing magnetic field. To obtain good beam properties, a theory of ideal circular beam focusing is used in design. The focusing magnetic field is calculated by balancing the radial forces. CST PARTICLE STUDIO simulation under space-charge-limited emission model shows good beam qualities with a parallel beam flow throughout the gun and interaction sections. The simulation result is in good agreement with design theory, the beam mean current density attains 24.4 A/cm^2 , fill factor 76.7% , beam transmission 100% .

Keywords: electron gun, focusing magnetic field, electron optics system, beam envelope

PACC: 4180, 4180D

* Project supported by the National Basic Research Program of China(Grant No. 2007CB310401) .

[†] E-mail : fysun@uestc.edu.cn