

1THz 回旋管双阳极磁控注入电子枪的分析及设计*

陈旭霖 赵青[†] 刘建卫 郑灵

(电子科技大学物理电子学院, 成都 610054)

(2011年5月12日收到; 2011年8月2日收到修改稿)

基于电子光学理论, 通过编程进行大量的数值计算, 设计了一支用于 1THz 回旋管的双阳极磁控注入式电子枪. 对双阳极磁控注入电子枪的计算及设计进行了阐述, 并对 1 THz 回旋管电子枪中高磁压缩比 ($f_m = 125$) 可能导致电子反转的问题进行了详细的分析和模拟. 通过对电子枪进行了仿真和优化, 最后计算和设计了一支速度比适中 ($\alpha = 1.3$), 速度零散较小 ($\Delta\beta < 8\%$) 的电子枪.

关键词: 1THz 回旋管, 双阳极磁控注入枪, 高磁压缩比

PACS: 41.75.Ht, 41.85.-p, 52.59.-f

1 引言

太赫兹波指频率介于 0.1—10 THz 范围内的电磁辐射. 过去相当长的时间里, 由于缺乏有效的产生和检测方法, 人们对 THz 波段的特性知之甚少, 被称为电磁波谱中的 THz 空隙. 近年来, 由于多方面的应用需求及 THz 辐射具有很多优越的特性, 进一步加快了太赫兹技术的发展, THz 回旋管是其中一种新的、具有很多独特优点的辐射源^[1-3], 国内外对频率在 0.1—3 THz 之间的回旋管进行了大量的研究和设计, 得到了一些较好的结果^[4-10]. 国内对回旋管的研究主要集中在 0.5 THz 以下的频段, 国外如 IAP, FU 和美国的 CCR 公司等对 0.6—3 THz 回旋管进行了研究, 但对作为回旋管的“心脏”-电子枪的研究尚未见报道. 本文基于电子光学理论, 编程计算了一支用于 1 THz 回旋管中的双阳极磁控注入电子枪, 分析了在 THz 回旋管中高磁压缩比的磁场下电子容易发生反转的问题, 在模拟中得到

了验证, 最后设计了一支速度比适中, 低速度零散的电子枪.

2 双阳极磁控注入电子枪物理模型

2.1 双阳极磁控注入电子枪结构及电子光学理论基础

电子枪的基本结构及磁场分布如图 1 所示. 其中, ϕ_b 表示磁场阴极倾角; ψ 表示阳极角; d_{ac} 表示阴极和第一阳极的间距; A 和 C 分别表示第一阳极的前极和后极; E_c 表示阴极区电场; B_c 表示回旋管中相互作用区磁场, B_0 表示阴极区磁场.

电子枪的光学系统为轴对称结构, 磁场为旋转对称静磁场, 电子枪工作电压在 10^4 V 量级, 电子运动方程考虑相对论效应. 在轴对称系统柱坐标系下, 电子光学系统的基本方程如下^[11,12]:

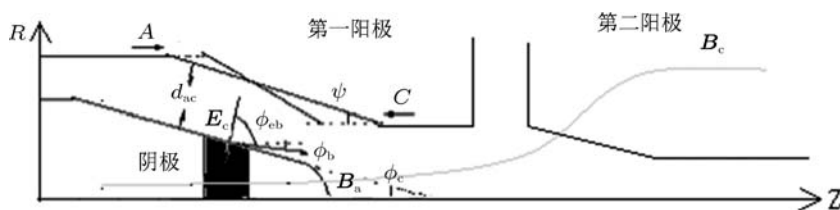


图 1 电子枪结构和轴向磁场示意图

* 四川科技支撑计划基金 (批准号: 2010G20157) 和国防科技重点实验室基金 (批准号: NKLC001102, W0411124) 资助的课题.

[†] E-mail: xlch_uestc@163.com or zhaoq@uestc.edu.cn

泊松方程为

$$\frac{\partial^2 U}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial U}{\partial r} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} = -\frac{\rho}{\epsilon}; \quad (1)$$

磁场表达式为

$$\frac{\partial^2(rA_\varphi)}{\partial r^2} - \frac{1}{r} \frac{\partial(rA_\varphi)}{\partial r} + \frac{\partial^2(rA_\varphi)}{\partial z^2} = -\mu_0 r J_\varphi; \quad (2)$$

电子运动方程为

$$\begin{aligned} \ddot{r} = & -\frac{\eta}{\gamma} \left[\left(1 - \frac{\dot{r}^2}{c^2} \right) E_r \right. \\ & \left. - \frac{r\dot{\varphi}}{c^2} E_\varphi - \frac{r\dot{z}}{c^2} E_z - \dot{z} B_\varphi + r\dot{\varphi} B_z \right] + \dot{r}\dot{\varphi}^2, \\ \ddot{\varphi} = & -\frac{\eta}{\gamma} \left[-\frac{\dot{\varphi}}{c^2} E_r + \left(\frac{1}{r} - \frac{r\dot{\varphi}^2}{c^2} \right) E_\varphi \right. \\ & \left. - \frac{\dot{\varphi}\dot{z}}{c^2} E_z + \frac{\dot{z}}{r} B_r - \frac{\dot{r}}{r} B_z \right] - 2\frac{\dot{r}\dot{\varphi}}{r}, \\ \ddot{z} = & -\frac{\eta}{\gamma} \left[-\frac{\dot{r}\dot{z}}{c^2} E_r - \frac{r\dot{\varphi}\dot{z}}{c^2} E_\varphi + \left(1 - \frac{\dot{z}^2}{c^2} \right) E_z - r\dot{\varphi} B_r + \dot{r} B_\varphi \right]; \end{aligned} \quad (3)$$

电流连续性方程为

$$\frac{\partial J_z}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial(rJ_r)}{\partial r} = 0. \quad (4)$$

上述四个方程共同组成了一个自治的方程组, 通过对方程组的求解, 可以得到电子枪中电子在电场、磁场及空间电荷共同作用下的运动轨迹.

对电子枪内电位进行幂级数展开, 得到其绕轴分布的级数表达式为^[13]

$$\begin{aligned} U(z, r) = & \phi(z) - \frac{1}{4} \phi''(z) r^2 + \frac{1}{64} \phi^{(4)}(z) r^4 + \dots \\ = & \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n \phi^{(2n)}(z)}{(n!)^2} \left(\frac{r}{2} \right)^{2n}. \end{aligned} \quad (5)$$

同样空间磁感应强度的级数展开式如下^[13]:

$$\begin{aligned} B_z(z, r) = & \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \frac{1}{(n!)^2} \left(\frac{r}{2} \right)^{2n} B^{2n}(z), \\ B_r(z, r) = & \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^{n+1} \frac{1}{(n!)(n+1)!} \left(\frac{r}{2} \right)^{(2n+1)} B^{(2n+1)}(z). \end{aligned} \quad (6)$$

2.2 双阳极磁控注入电子枪模型的理论分析

设电子枪系统均为轴对称系统, 电子枪的结构如图 1 所示. 同时假设, 系统内除静电、

磁场外, 不存在高频场, 且静电、磁场与角向无关: $E = E(r, z)$, $B = B(r, z)$, 在近轴区的磁场有 $B_z(0, z) = B(z)$.

柱坐标系 (r, θ, z) 下, 考虑相对论效应时, 由角动量守恒定律得

$$\left(\gamma_0 m_0 r^2 \dot{\theta} - \frac{e B_z}{2} \right) r^2 = \text{const}. \quad (7)$$

在相互作用区入口处, 有下式成立^[14]:

$$\left(\gamma_0 m_0 r^2 \dot{\theta} - \frac{e B_z}{2} \right) r^2 = \frac{e B_z}{2} (R_1^2 - R_g^2), \quad (8)$$

其中, R_1 表示拉莫半径, R_g 表示引导中心半径.

不考虑发射面附近电子的角向运动时, $\theta=0$, 上式化为

$$B_c R_c^2 = B_0 (R_g^2 - R_1^2), \quad (9)$$

其中, R_c 表示阴极半径, B_0 表示相互作用区入口处的磁感应强度, B_c 表示阴极发射区的磁感应强度.

引入表征磁场性能的参数——磁场压缩比

$$f_m = B_0 / B_c. \quad (10)$$

当 $R_1/R_g \rightarrow 0$, 即电子注近似在 R - Z 平面内运动时, 磁场压缩比可以近似的表示为

$$f_m \approx \left(\frac{R_c}{R_g} \right)^2. \quad (11)$$

一般而言, 阴极半径不宜过大, 因为大的阴极半径除了会增大电子注的速度离散外, 还使器件的横向体积增大, 不利于器件的小型化. 在图 2 中, 横坐标表示阴极磁感应强度值, 单位为 T, 纵坐标的左边表示阴极半径大小, 单位为 mm, 右边表示磁场压缩比大小. 可以看出: 随着阴极磁场的增大, 阴极半径和磁场压缩比都随之减小.

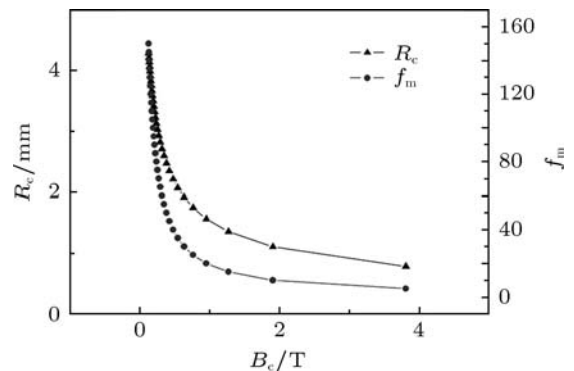


图 2 阴极磁场与阴极半径、磁场压缩比的关系

磁控注入枪发射带为空心环状, 设阴极平均半径 R_c , 阴极发射能力确定, 电子注电流已知时, 发

射带斜面宽度由下式确定^[14]:

$$l_s = \frac{I_0}{2\pi R_c J_c}. \quad (12)$$

可知, 在阴极发射能力有限 (一般 $<10 \text{ A/cm}^2$) 的条件下, 要想得到尽可能大的工作电流, 就必须增大阴极发射带宽度或者增大阴极半径. 显然, 联立 (9) 式和 (12) 式可以进一步确定参数的适用范围.

电子注的厚度是电子注的一个重要参量, 过厚的电子注可能会导致注波相互作用效率的降低, 必须对其进行考察. 对 (9) 式两边求微商得到下面的表达式:

$$R_c \Delta R_c = f_m R_g R_g, \quad (13)$$

其中, $\Delta R_c = l_s \sin \phi_c$, 联立 (12) 式和 (13) 式有

$$\frac{\Delta R_g}{R_g} = \frac{\sin \phi_c}{1 + \mu^2} \frac{I_0}{2\pi R_c^2 J_c}, \quad (14)$$

其中, $\mu = [(R_g/R_1)^2 - 1]^{-1/2}$. 上式中, 利用相互作用半径的波动幅度来表征电子注的厚度. 并得到在不同倾角时, 其与阴极半径的关系图 3. 可以看出: 随着阴极半径的增大, 引导中心半径零散降低; 当阴极角度增大时, 引导中心半径零散也增大.

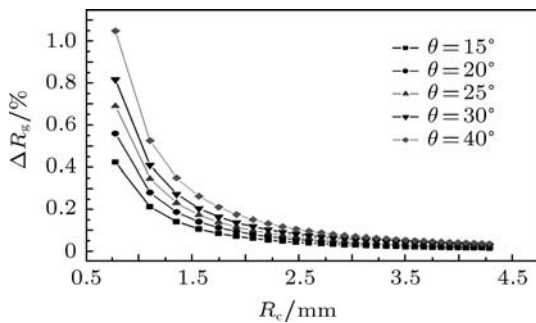


图 3 不同阴极角情况下阴极半径同引导中心半径零散的关系

在磁控注入枪的初始设计中, 应当防止电子注直接落在阳极壁上, 即阴极与第一阳极间距离必须满足^[14,15]

$$d_{ac} > \frac{R_{lc}}{\cos \phi_c}. \quad (15)$$

双阳极电子枪中第一阳极电压的表达式为^[14,15]

$$U_a = \frac{m_0 c^2 \ln(1 + d \cos \phi / R_c)}{e \ln(1 + 2u)} \left\{ \left[1 + \frac{4}{u^2} \left(\frac{1+u}{1+2u} \right)^2 \times \left(\frac{\gamma_0^2 - 1}{\cos^2 \phi} \right) \left(\frac{R_c}{R_1} \right)^2 K \right]^{1/2} - 1 \right\}, \quad (16)$$

其中, $K \approx \frac{\alpha^2}{1 + \alpha^2}$ 为横向能量与总能量之比.

3 数值计算及分析

由回旋管相互作用部分的计算和仿真^[16-20], 对电子注的参数要求为: 相互作用磁场 $B_0 = 19.05 \text{ T}$, 引导中心半径 $R_g = 0.35 \text{ mm}$, 注电流 $I = 0.25 \text{ A}$, 注电压 $U_0 = 30 \text{ kV}$, 速度比 $\alpha = 1.2-1.4$, 速度零散 $<8\%$.

考虑器件小型化及降低电子的速度零散, 阴极半径选择在 5 mm 左右, 因此阴极半径磁场的压缩比大约为 130. 经过计算得到大致的电子枪结构参数如表 1.

表 1 电子枪初始结构

阴极半径/mm	4.5
阴极倾角/(°)	23
阴阳极间距/mm	8
第一阳极倾角/(°)	28
第一阳极电压/kV	12
第二阳极电压/kV	30

选择初始磁场分布如式为^[14]

$$B_z(z) = B_c \left(\left(\frac{B_0}{B_c} - 1 \right) \left(\frac{z - z_c}{z_0 - z_c} \right) + 1 \right)^{-1}, \quad (17)$$

其中, B_c 代表相互作用区磁场, B_0 代表阴极区磁场, z_c 表示进入相互作用区磁场的轴向位置, z_0 表示阴极区磁场的轴向位置.

在近轴区, 由 (6) 式, 近似的取表达式的第一项, 则有

$$\begin{aligned} B_z(z, r) &\approx B(z), \\ B_r(z, r) &\approx -\frac{r}{2} B'(z). \end{aligned} \quad (18)$$

又由 (3) 式有

$$\begin{aligned} F_z = -\frac{e}{\gamma} \left[-\frac{\dot{r}z}{c^2} E_r - \frac{r\dot{z}\dot{\phi}}{c^2} E_\phi + \left(1 - \frac{z^2}{c^2} \right) E_z \right] \\ + \frac{e}{\gamma} [r\dot{\phi} B_r - \dot{r} B_\phi]. \end{aligned} \quad (19)$$

(3) 及 (19) 式表明, 沿 z 方向的力主要由电场产生, 它的主要作用是产生电子引导中心的漂移, 而磁场主要作用是约束电子绕引导中心的回旋运动. 同时由 (19) 式可以看出磁场也对电子有一个 z 向的作用力, 这个力的大小与径向的磁场有关, 由 (18) 式可以看出 $B_r(z, r)$ 的大小主要与 $-\frac{r}{2} B'(z)$ 有关, 当磁压缩比较大时, 磁场在一定范围内变化的较快, 使得 $B_r(z, r)$ 变大. 这个径向磁场随着 z 的变大而

变大, 当在 z 轴的某个位置增大到一定数值时, 由径向磁场产生的这个 z 向的作用力可能导致电子沿 z 的运动方向反转, 使电子打回阴极发射带. 这种情况下电子打不出电子枪, 也不会输出需求的电子注. 电子的反转使得电子枪不能工作, 同时会对阴极造成极大的损害, 降低阴极的寿命, 这是在设计中不能允许的.

为了阻止电子反转的情况出现, 由上面的分析, 可以考虑从两个方面来调整及优化. 第一, 减缓磁场的变化速度, 特别是阴极的磁场变化率. 因为从阴极出发的电子注的质量对最后出口的电子注质量影响是最大的. 为此, 可以延长阴极平滑磁场的长度, 通过不断改变阴极磁场的长度得到的与电子反转位置的关系如图 4 所示. 可以看出, 当阴极平滑磁场的长度在一定范围内增大时, 电子反转位置向 z 正向移动. 可以看出其对电子反转的影响是显著的.

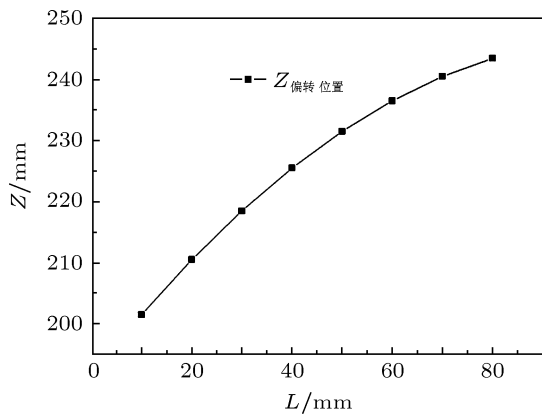


图 4 阴极磁场的长度与电子反转位置的关系

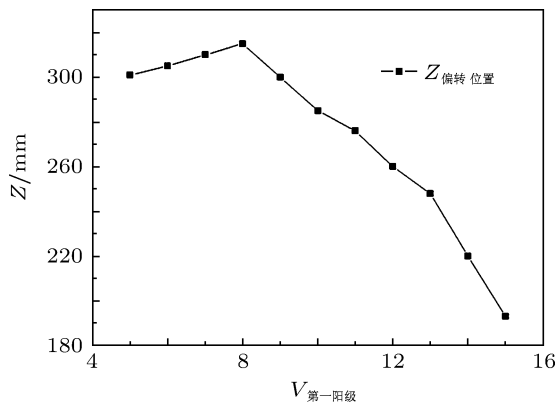


图 5 第一阳极电压与电子反转位置关系

第二, 改变阴阳极电场分布. 电子的反转也可看做是总能量对横向能量的转化率过高, 由于电磁场是绝热的, 总的能量是恒定的, 纵向能量降低导致纵向即 z 向的电子速度降低至 0, 此时电子受到负 z 向力的作用就会发生反转. 所以可以通过改变

阴极和第一阳极区的电场来降低横向能量的转化率, 以达到控制电子的 z 向能量不至于减小过多引起电子反转. 由图 5 和图 6 可以看出, 降低第一阳极电压及在一定范围内减短第一阳极后极的长度都能显著延长电子注的反转位置. 由图 7 和图 8 可以看出, 增大阴极前级的角度和减小阴极后极的角度都能有效的降低电子横向能量的转化, 使电子反转的位置向 z 正向移动. 由图 9 和图 10 可以看出, 一定范围内调整阴极与第一阳极的距离以及第一阳极角的大小能使电子反转的位置右移.

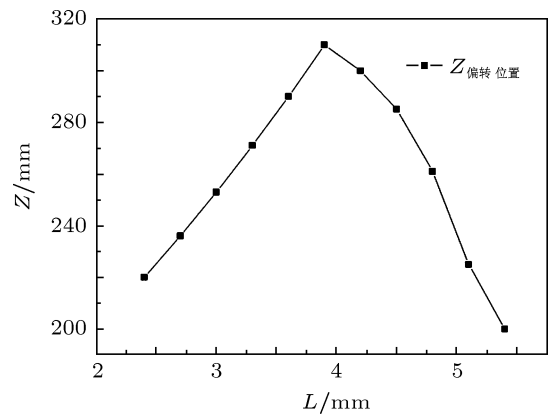


图 6 第一阳极后极的长度与电子反转位置关系

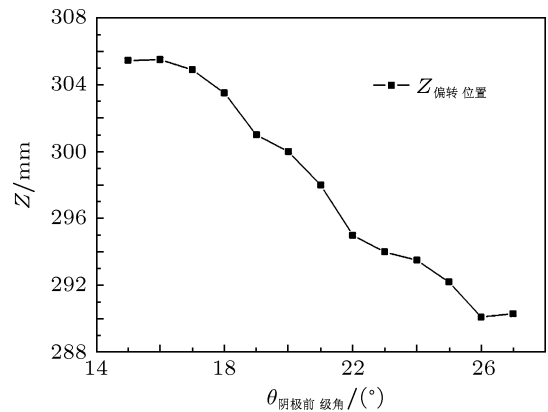


图 7 阴极前级角度与电子反转位置关系

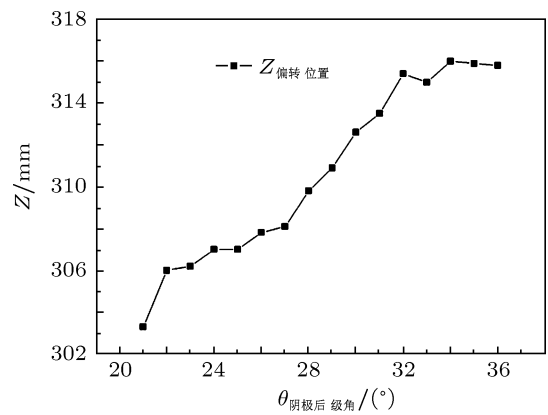


图 8 阴极后级角度与电子反转位置关系

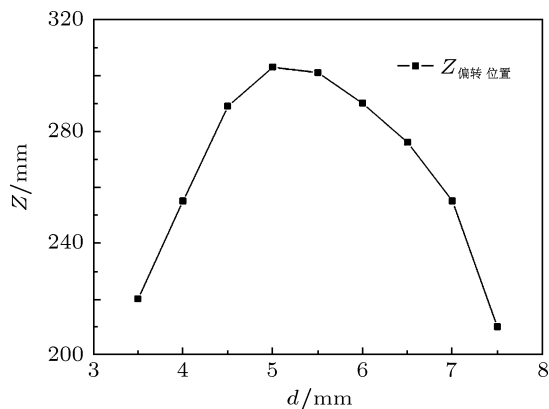


图9 阴极与第一阳极距离与电子反转位置关系

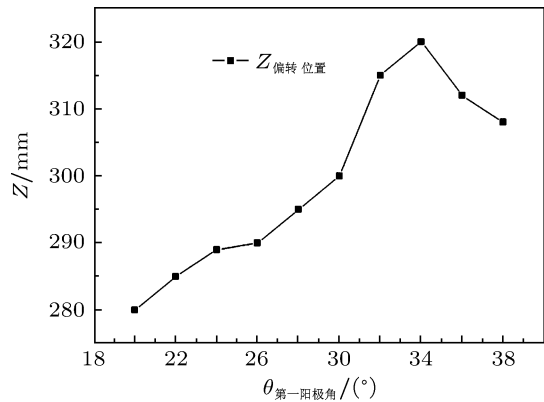


图10 第一阳极角与电子反转位置关系

经过初步调整磁场分布和电子枪的结构, 得到电子注不反转的初步结构, 再通过大量的数值仿真对电子枪结构细致的调整, 最后得到了一支性能较好的 1THz 双阳极磁控注入枪.

模拟得到的电子枪注轨迹分布图 11, 可以看出, 电子注层流性好, 未出现电子打在阳极上, 电子反转等情况.

电子枪的出口处电子注电流大小如图 12, 可以看出, 在出口位置注电流趋于稳定, 分布于 0.23A 附

近, 电子注的稳定性较好.

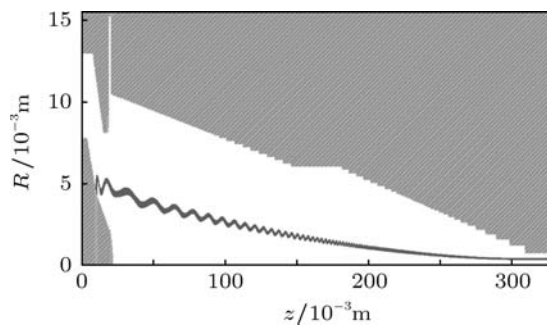


图11 电子枪注轨迹的分布

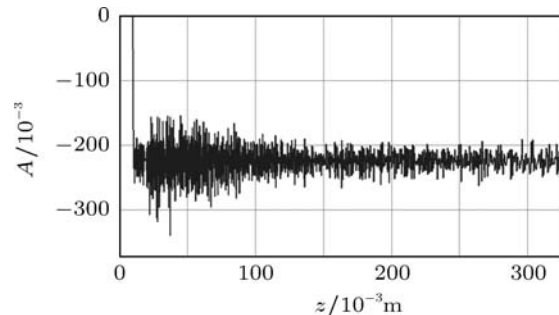


图12 电子枪电子注电流分布

电子枪中电子注横向和轴向速度在出口处分布如图 13, 可以看出, 电子的横向速度逐渐增大最后稳定于 $8.6 \times 10^7 \text{m/s}$, 电子注的层流性和同步性较好, 基本无电子发生反转; 电子速度出口处轴向速度稳定于 $6.6 \times 10^7 \text{m/s}$, 电子注未发生反转且同步性较好.

具体的优化后电子注性能参数及枪结构参数如表 2 所示, 可以看到, 模拟的电子枪的零散度较小 (小于 8%), 速度比较为适中 (速度比为 1.31), 电子注厚度适中, 电子注整体性能较好, 满足整管的需求.

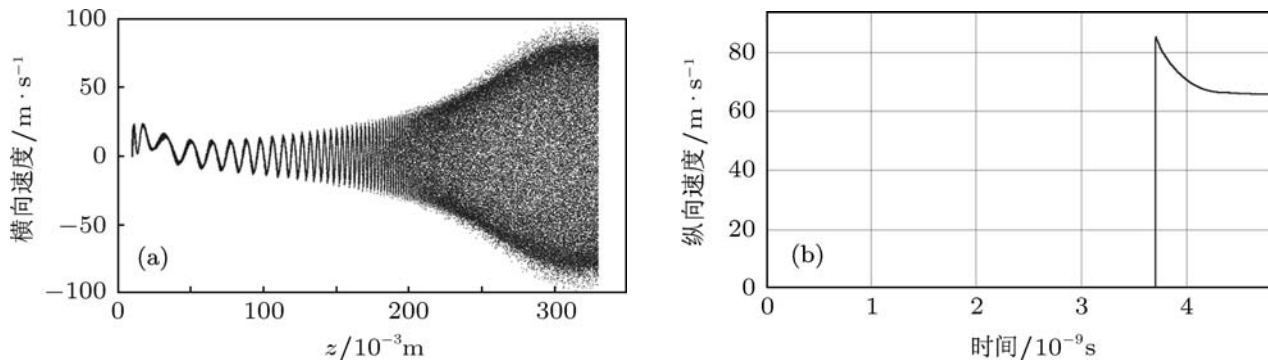


图13 (a) 电子注横向速度沿轴分布; (b) 电子注纵向速度出口处分布

表2 优化后电子枪结构及电子注参数

阴极中心半径/mm	4.5
相互作用区磁场/T	19.05
磁压缩比	141
电子注电流/A	0.23
电子注电压/kV	30
引导中心半径/mm	0.35
电子注速度比	1.31
电子注横向速度零散/%	3.8
电子注纵向速度零散/%	3.1

4 结论

本文从电子光学的基本理论出发,对太赫兹频段的双阳极磁控注入电子枪的设计及优化方面进行了理论上的阐述和分析推导,对在1THz回旋管电子枪中在高磁压缩比下可能发生的电子反转的情况进行了详细的理论分析,通过数值计算及模拟仿真,对分析的结论进行了验证.最后在此基础上计算和仿真了一支1THz回旋管电子枪,最后得到一支性能较好的电子枪(速度比为1.31,速度零散为7%).

- [1] Liu Sh G 2006 *China Basic Science* **1**7(in Chinese) [刘盛纲 2006 中国基础科学 **1** 7]
- [2] Li Zh L, Feng J J, Wang E F, Liu B T 2009 *Journal of CAEIT* **4** 238(in Chinese) [李志良, 冯进军, 王峨峰, 刘本田 2009 中国电子科学研究院学报 **4** 238]
- [3] Hong K D, Brand G F, Idehara T 1993 *J Appl Phys.* **74** 5250
- [4] Fu W J, Yan Y, Yuan X S, Li X Y, Liu SH G 2009 *High Power Laser And Particle Beams* **21** 395(in Chinese) [傅文杰, 鄢扬, 袁学松, 黎晓云, 刘盛纲 2009 强激光与粒子束 **21** 395]
- [5] Sun X, Zhao Q, Li H F 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 2130(in Chinese) [孙旭, 赵青, 李宏福 2008 物理学报 **57** 2130]
- [6] Idehara T, Ogawa I, La Agusu, Kanemaki T, Mitsudo S, Saito T, Fujiwara T, Takahashi H 2007 *Int. J. Infrared Milli. Waves* **28** 433
- [7] Glyavin M, Khizhnyak V, Luchinin A, Idehara T, Saito T 2008 *Int. J. Infrared Milli. Waves* **29** 641
- [8] Piosczyk B, Dammertz G, Dumbrajs O, Drumm O, Illy S, Jin J, Thumm M 2004 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **32** 413
- [9] Hornstein M K, Bajajv S, Griffin R G 2005 *IEEE Trans Electron Devices* **47** 798
- [10] Dammertz G, Borie E, Iatrouc T 2000 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **28** 561
- [11] Zhao Q, Li H F, Ren T, Luo Y 2003 *Nuclear Physics Review* **20** 264(in Chinese) [赵青, 李宏福, 任同, 罗勇 2003 原子核物理评论 **20** 264]
- [12] Zhao Q, Li H F, Luo Y, Deng X, Yu Shen, Wang L 2004 *High Power Laser And Particle Beams* **16**(in Chinese) 764[赵青, 李宏福, 罗勇, 邓学, 喻胜, 王丽 2004 强激光与粒子束 **16** 764]
- [13] Du B Ch, Wang J R 2002 *Electron Optics*(in Chinese) (Beijing: Tinghua University Press)(in Chinese)[杜秉初、汪健如 2002 电子光学(北京: 清华大学出版社)第70—71页]
- [14] Dong Ai X 2006, *MS.Dissertation* (Chengdu: University of Electronic Science and Teachnology of China)(in Chinese)[董爱香 2006 硕士学位论文(成都: 电子科技大学)]
- [15] Zhao Q, Dong Ai X, Li H F, Luo Y, Wu X Q, Liu SH G 2007 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **4** 402
- [16] Lawson W 1988 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **16** 290
- [17] Kuftin A N, Lygin V K, Manuilov V N, Raisky B V, Solujanova E A, Tsimring S E 1993 *International Journal of Infrared and Millimeter Waves* **14** 783
- [18] Zhou Y 2005 *MS dissertation* (Chengdu: University of Electronic Science and Teachnology of China) (in Chinese) [周勇 2005 THz 硕士学位论文(成都: 电子科技大学)]
- [19] La. Agusu, Idehara T, Mori H, Saito T, Ogawa I, Mitsudo S 2007 *Int J Infrared Milli Waves* **28** 315
- [20] Du P Zh, Li H F, Huang Y 1994 *Journal of UEST of China* **23** 400(in Chinese) [杜品忠, 李宏福, 黄勇 1994 电子科技大学学报 **23** 400]

Analysis and design of a double-anode magnetron injection gun for 1 THz gyrotron*

Chen Xu-Lin Zhao Qing[†] Liu Jian-Wei Zheng Ling

(Institute of Physical Electronics, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

(Received 12 April 2011; revised manuscript received 2 August 2011)

Abstract

Based on the electron optics theory, through a massive numerical calculation by programming, a double-anode magnetron injection gun (MIG) for a 1 THz gyrotron is designed. The method of calculation and design of MIG is expounded, and the problem that high magnetic compression ratio in THz gyrotron (compression ratio of 125 in electron gun for 1THz gyrotron in this paper) could lead to the reversal of direction of electron flow is also detailedly analyzed and simulated. Through simulation and optimization, an MIG with a modest velocity ratio of the beam ($\alpha = 1.3$) and a low velocity spread ($\Delta\beta < 8\%$) is designed.

Keywords: 1THz gyrotron, magnetron injection gun, high magnetic compression ratio

PACS: 41.75.Ht, 41.85.-p, 52.59.-f

* Project supported by the Key Technology Research and Development Program of Sichuan Province, China (Grant No.2010G20157), and the Foundation of National Defense Key Laboratory (Grant Nos.NKLC001102, W0411124).

[†] E-mail: xlch_uestc@163.com or zhaoq@uestc.edu.cn