

文章编号: 1001-4322(2007)04-0643-04

带状注速调管电子光学系统的设计与模拟*

杨景华^{1,2}, 王 勇¹, 王树忠¹

(1. 中国科学院 电子学研究所, 北京 100080; 2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

摘 要: 设计了对有限宽带注进行聚焦的周期永磁(PPM)磁场, 利用 E-GUN, SUPERFISH, MAFFIA 和 PIC 模拟软件, 建立了计算具有平面对称结构的 2 维及 3 维电子光学系统模拟平台, 并应用此平台对 X 波段、100 MW 带状注速调管的电子光学系统进行了设计与模拟。结果显示, 利用设计的 PPM 聚焦系统, 当磁场周期为 60 mm, 入口处磁场为 0.1 T 时, 在 600 mm 的传输距离下, 电子注的通过率达到了 99.6%。

关键词: 带状注速调管; 电子光学系统; 电子枪; PPM 聚焦; 摇摆聚焦

中图分类号: TN122 文献标识码: A

1938 年, 俄罗斯的 Kovalenko 首先提出了带状注速调管(SBK)的概念^[1]。20 世纪 80 年代, 由于高功率微波源的需要, 以及带状注速调管所具有的低电压、高功率的优点和计算机 3 维模拟方法的发展, 带状注速调管成为了研究热点。

电子注的产生、形成和聚焦是实现高性能 SBK 的最关键的技术问题之一。已有许多文献对 SBK 的应用和性能进行了模拟研究^[1-9]。从模拟结果来看, 设计高压压缩比电子枪、获得较好的电子注层流性以及实现高的电子注通过率是三个较难解决的问题。本文对 X 波段 100 MW 带状注速调管电子光学系统进行了设计与模拟; 采用圆柱形皮尔斯电子枪与周期永磁(PPM)聚焦系统, 在较长的距离范围内实现了较大的注压缩比、良好的电子注层流性以及较高的束流通过率。

1 带状电子注的聚焦

1.1 聚焦结构的选择

要使带状电子注在由螺线管产生的均匀磁场中进行长距离且稳定的传输, 需要较高的磁场^[10-11]。而制造可以产生较高磁场的螺旋管会增加整个系统的体积和重量, 也提高了成本。PPM 聚焦及摇摆(Wiggler)聚焦由于都是利用周期永磁体产生聚焦^[10-13], 因而具有体积小、重量轻以及杂散磁场小等优点, 并可以避免低频交流不稳定性。与摇摆聚焦方式相比, PPM 聚焦在水平方向上的摆动较小。一般说来, 主要有两种 PPM 形式: 开放式 PPM 聚焦结构和闭合式 PPM 聚焦结构, 这两种聚焦形式都能提供垂直和水平方向上的聚焦。综合考虑, 本文采用闭合式 PPM 聚焦结构作为 SBK 的聚焦系统。在电子注边缘加入四块磁铁可以产生垂直方向的磁场, 以提供水平方向边缘电子注的聚焦。

1.2 PPM 结构模型

线状矩形 PPM 结构模型见文献 [10]。PPM 聚焦系统在 x, y, z 方向上的磁场强度为

$$\begin{cases} B_x = -(k_x/k_m)B_0 \sinh(k_x x) \cosh(k_y y) \cos(k_m z) \\ B_y = -(k_y/k_m)B_0 \cosh(k_x x) \sinh(k_y y) \cos(k_m z) \\ B_z = B_0 \cosh(k_x x) \cosh(k_y y) \sin(k_m z) \end{cases} \quad (1)$$

式中 $k_x \approx k_m / \sqrt{1 + a_m^2/b_m^2}$, $k_y \approx k_m / \sqrt{1 + b_m^2/a_m^2}$, $k_m^2 = k_x^2 + k_y^2$, a_m, b_m 分别为 PPM 结构的宽度与厚度, $k_m = 2\pi/L_m$, L_m 为磁场周期, B_0 为一常数, 与磁铁尺寸、磁场周期和磁化强度有关。如果 $a_m \gg b_m$, 则 $k_x \approx 0$, 进而 $B_x \approx 0$, (1) 式变为

$$\begin{cases} B_y = -B_0 \sinh(k_m y) \cos(k_m z) \\ B_z = B_0 \cosh(k_m y) \sin(k_m z) \end{cases} \quad (2)$$

* 收稿日期 2006-06-16; 修订日期 2007-01-04
基金项目 国家自然科学基金资助课题(60501019)
作者简介 杨景华(1980—), 女, 硕士生, 主要从事大功率微波器件研究, jian1232w@sohu.com。

1.3 磁场与周期的确定

1.3.1 带状注的布里渊磁场

本文中,电子枪的阴极采用完全屏蔽,即电子枪区不存在磁场。因此入口处的磁场应该近似为布里渊磁场。非相对论带状电子注的布里渊磁场为^[14]

$$B_B = \sqrt{\frac{I(w \delta_r)}{0.924 \times 10^6 V^{0.5}}} \quad (3)$$

式中 w 和 δ_r 分别为电子注的宽度和半厚度; V 与 I 分别为注电压与注电流。

1.3.2 磁场周期的估算

为满足电子注的稳定性条件^[14],磁场周期 L_m 应该满足

$$L_m \leq 0.31 \lambda_p, \quad \lambda_p = \frac{2\pi v_0}{\omega_p}, \quad \omega_p = \sqrt{\frac{\eta I_0}{2\varepsilon_0 v_0 \gamma_0}} \quad (4)$$

式中 λ_p 与 ω_p 分别为等离子体波长和振荡频率; I_0 为单位宽度上的电流; v_0 为电子沿 z 轴的速度; η 为电子的荷质比; ε_0 为真空介电常数; γ_0 为电子注的平衡半厚度(布里渊厚度)。

X 波段 100 MW 带状注速调管电子光学系统的设计要求为:注电压 385 kV,注电流 477.8 A,电子注宽度 100 mm,电子注厚度 8 mm,面压缩比(厚度压缩比)为 5。由公式(3)可得到 B_B 为 4.56×10^{-2} T。本文考虑了相对论效应,布里渊磁场应小于此值^[8]。由公式(4)可得到 $L_m \leq 70$ mm,为设计方便,本文取 $L_m = 60$ mm。

2 带状注电子光学系统的 2 维模拟和分析

由于 3 维软件模拟时间较长,且带状注速调管的电子注宽度远远大于其厚度,故可以近似等效为 2 维情况。具体步骤如下:①利用 2 维设计软件 E-GUN、2 维 PIC 模拟软件以及 2 维磁场设计软件 SUPERFISH 设计无限宽带状注的 2 维 SBK 电子光学系统;②利用 3 维电磁场软件 MAFFIA 设计 PPM 聚焦系统,并将得到的磁场数据导入到 3 维 PIC 模拟软件中对理想束流进行模拟,以便在较短的时间内判断所设计的磁场能否使电子注得到较好的聚焦;③参照 2 维设计中的电子枪与聚焦系统结构,在 3 维 PIC 模拟软件中进行建模来设计有限宽带状注的 3 维 SBK 电子光学系统,加入磁场后,调整电子枪的结构与磁场入口处的位置,使得到的电子轨迹符合设计要求。

2.1 电子枪的设计

电子枪采用圆柱形皮尔斯电子枪,选用直角坐标系。利用 2 维模拟软件 E-GUN 对电子枪进行设计并对其参量不断调整,使得在满足耐压要求的情况下(即小于 15 kV/mm),得到层流性较好的静电轨迹,如图 1 所示。由此计算得到的压缩比略大于 5。为了能模拟加入 PPM 磁场后的电子轨迹,可利用 E-GUN 中的设计参数,用 PIC 软件重新进行静电轨迹 2 维模拟,结果如图 2 所示,电流密度约为 11.3 A/cm^2 。

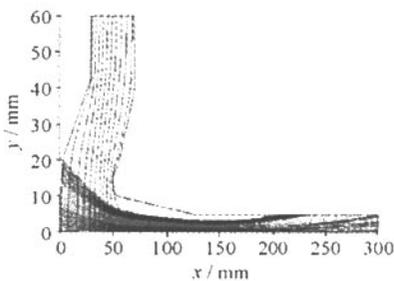


Fig. 1 Electrostatic track of vertical dimension by E-GUN

图 1 用 E-GUN 软件模拟得到的垂直方向的静电轨迹

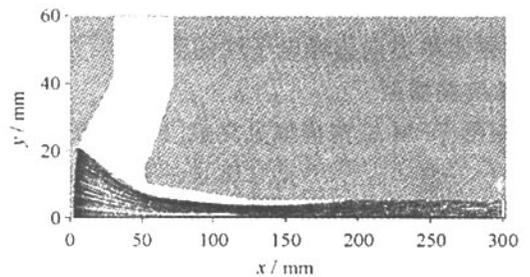


Fig. 2 Electrostatic track of vertical dimension by PIC

图 2 PIC 软件模拟得到的垂直方向的静电轨迹

2.2 磁场的设计

由于 Wiggler 与 PPM 聚焦方式在垂直方向上聚焦效果相同^[12],为了设计上的便利,设计如图 3 所示的磁场并导入到 2 维 PIC 模拟软件中。调整电子枪的结构与磁场入口处的位置,得到如图 4 所示的电子轨迹。磁场周期为 60 mm 时,模拟需要的最小磁场 $B_0 \approx 0.04$ T。从图 4 可以看出,在大约 330 mm 处,电子注的边缘开始有部分电子打到管壁上。经模拟计算得到,当传输距离为 600 mm 时,电子注的通过率只有 93.3%。

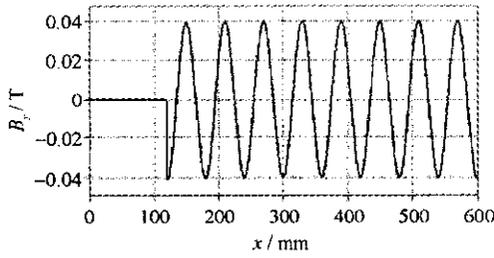


Fig. 3 Magnetic field component B_y along x axis

图 3 B_y 沿 x 轴的变化曲线

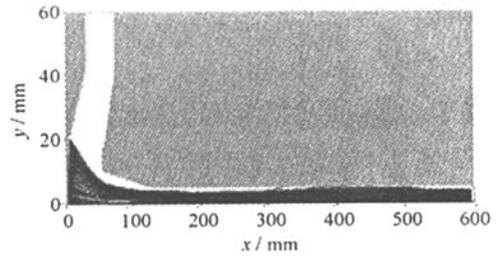


Fig. 4 Electron track focused by magnetic field

图 4 加入磁场后的电子轨迹

3 带状注电子光学系统的 3 维模拟和分析

首先,利用 MAFIA 设计 PPM 磁场。图 5 为当 $x=0\text{ mm}$ $y=0\text{ mm}$ 时沿 z 轴的磁场变化曲线,图 6 为当 $y=0\text{ mm}$ $z=100\text{ mm}$ 时沿 x 方向的磁场变化曲线。然后,对理想束流(直接从设定的发射面发射出的电子注)进行模拟,如图 7 所示。由图 7 可以看到,在 xz 平面内电子注聚焦良好;而对于 yz 平面,在传输距离约为 336 mm 处,电子注的边缘电子开始向外发散。实际上,对于大尺寸的带状注来说,由于水平电场力的作用,在 2 个等离子体周期附近,电子注的边缘束流会发生畸变^[8]。经计算,本文的等离子体周期为 0.9 ns。在模拟过程中观察到,在大约 1.5 ns 时,会发生边缘电子的畸变现象。模拟发现,当磁场周期 L_m 为 60 mm、轴上磁场 B_0 为 0.04 T 时,在束流传输长度为 600 mm 的范围内,电子注的通过率为 95%。

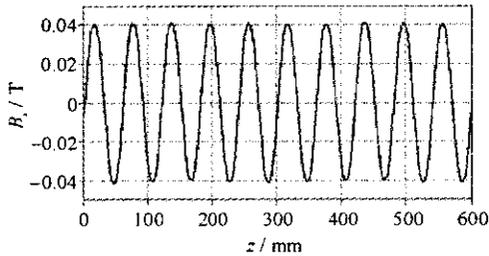


Fig. 5 Magnetic field component B_z along z axis

图 5 B_z 沿 z 轴的变化曲线

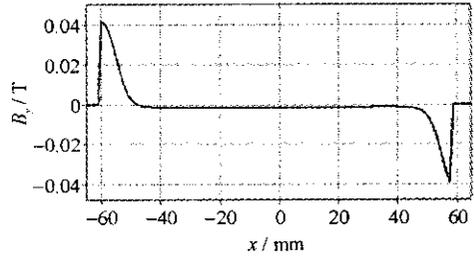


Fig. 6 Magnetic field component B_y along x axis

图 6 B_y 沿 x 轴的变化曲线

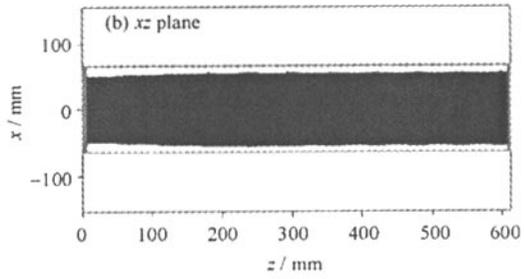
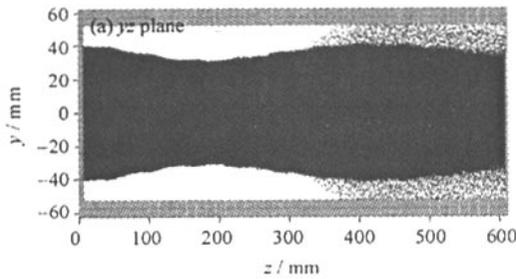


Fig. 7 Electron track of an ideal beam through PPM structure

图 7 理想束流通过 PPM 磁场后的电子轨迹

在 3 维设计中,利用 2 维设计的电子枪参数进行静电轨迹模拟时,发现压缩比小于 5。这是因为 3 维结构的电子枪包含两对聚焦极。这样,除了垂直方向的束流受到压缩以外,水平方向的束流同样因受到压缩而向中间挤压,因此电子注的空间电荷密度增加,垂直方向的空间电荷力相应增加,使得边缘电子注的扩散变得更加严重。

采取调整方法为:在垂直方向上减小聚焦极与阴极的夹角,在水平方向上增加聚焦极与阴极的夹角,直到得到的压缩比大于 5,并且电子轨迹的层流性良好。然后将设计好的磁场导入 3 维 PIC 模拟软件中。模拟发现,若磁场大小为 $4 \times 10^{-2}\text{ T}$,则根本不能使电子注得到聚焦。这是因为在磁场入口处,水平方向电子注的边缘受到水平聚焦极的压缩作用过大,导致垂直方向电子注受到较大的空间电荷力,因此需要增大入口处的磁场。调整电子枪的结构与磁场入口处的位置,得到需要的最小磁场约为 0.074 T。继续增大磁场到 0.1 T,得到如图 8 所示的电子轨迹。从图 8 可以看出,通过 PPM 聚焦系统,电子注在 yz 和 xz 平面都能得到较好的聚焦,计算发现,在束流传输约 600 mm 的情况下,束流通过率约为 99.6%。

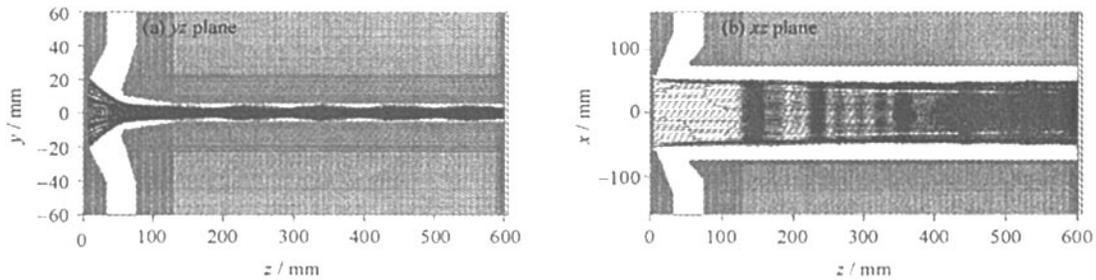


Fig. 8 Electron track of the beam through PPM structure

图 8 实际束流通过 PPM 磁场后的电子轨迹

4 结 论

本文验证了 PPM 聚焦对有限宽带状注聚焦的可行性,建立了计算平面对称系统的 2 维及 3 维模拟平台,并应用此平台对 X 波段 100 MW 的带状注速调管的电子光学系统进行了初步的设计与模拟。结果显示,当电子注通过设计的 PPM 聚焦系统时,在传输距离为 600 mm 的情况下,通过率达到了 99.6%。

参考文献:

- [1] Caryotakis G. A sheet beam klystron paper design[R]. SLAC-PUB-8967 2001.
- [2] Scheitrum G , Caryotakis G , Burke A , et al. W-band sheet beam klystron research at SLAC[C]//2006 IEEE International Vacuum Electronics Conference. 2006 , 2 : #81-482.
- [3] Solyga S , Henke H. Two-dimensional design of a low voltage mm-wave sheet beam klystron[J]. *ITG Fachber* , 1998 , 150 : 275-279.
- [4] True R. A theory for coupling gridded gun design with PPM focussing[J]. *IEEE Trans on Elect Devices* , 1984 , 31(3) 353-362.
- [5] Read M E , Jabotinski V , Miram G , et al. Design of a gridded gun and PPM-focusing structure for a high-power sheet electron beam[J]. *IEEE Trans on Plasma Science* , 2005 , 33(2) 647-653.
- [6] Read M E , Miram G , Ives R L , et al. A gridded electron gun for a sheet beam klystron[C]//Proc of Particle Accelerator Conference. 2003 , 2 : 1137-1139.
- [7] Scheitrum G , Caryotakis G , Burke A , et al. W-band sheet beam klystron design[C]//Conference Digest of the 2004 Joint 29th International Conference. 2004 , 27 : 525-526.
- [8] Colby E R , Caryotakis G , Fowkes W R , et al. W-band sheet beam klystron simulation[R]. SLAC-PUB-11471 , 1998.
- [9] Calabazas Creek Research Inc. Final report for sheet beam klystron program[R]. DE-FG02-03ER83617 2004.
- [10] Booske J H , McVey B D , Antonsen Jr T M. Stability and confinement of nonrelativistic sheet electron beams with periodic cusped magnetic focusing [J]. *J Appl Phys* , 1993 , 73(9) #140-4155.
- [11] Booske J H , Basten M A , Kumbasar A H , et al. Periodic magnetic focusing of sheet electron beam[J]. *D Phys Plasmas* , 1994 , 1(5) : 1714-1720.
- [12] Carlsten B E , Russell S J , Earley L M , et al. Technology development for a mm-wave sheet-beam traveling-wave tube[J]. *IEEE Trans on Plasma Science* , 2005 , 33(1) 85-93.
- [13] Basten M A , Booske J H. Two-plane focusing of high-space-charge sheet electron beams using periodically cusped magnetic fields[J]. *J Appl Phys* , 1999 , 85(9) : 6313-6322.
- [14] Pierce J R. Theory and design of electron beams 2nd edition[M]. New York : Van Nostrand , 1954.

Design and simulation of electron-optical system of sheet beam klystron

YANG Jing-hua^{1,2} , WANG Yong¹ , WANG Shu-zhong¹

(1. Institute of Electronics , Chinese Academy of Sciences , Beijing 100080 , China ;

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

Abstract : Design methods for periodic permanent magnet focusing system are presented. Using E-GUN , SUPERFISH , MAFIA , and PIC , 2D and 3D simulation platforms of electron-optical system with plane symmetry are established , and the electron-optical system in X-band 100 MW sheet beam klystron is designed and simulated. The simulation result shows that the beam transmission is 99.6% in a 600 mm propagation distance when the period of the magnetic field is 60 mm , and the magnetic field intensity of the entrance is 0.1 T.

Key words : Sheet beam klystron ; Electron-optical system ; Electron gun ; Periodic permanent focusing ; Wiggler focusing