

大回旋电子注双磁会切电子枪的数值模拟

邹峰^{①②} 薛谦忠^① 刘濮鲲^①

^①(中国科学院电子学研究所 北京 100190)

^②(中国科学院研究生院 北京 100039)

摘要: 该文分析了双磁会切电子枪的理论模型,建立了会切磁场模型,采用EGUN和MAGIC模拟,设计出了产生大回旋电子注的双磁会切电子枪,该枪的电子注速度比为1.38,轴向速度零散为3.7%。文中分析了电子注速度比、速度零散沿轴线的分布情况,进而讨论了不同的会切磁场变换宽度对电子注参量所带来的影响,为双磁会切电子枪设计的参量选择提供了依据。

关键词: 回旋行波管放大器; 电子枪; 双磁会切; 大回旋电子注

中图分类号: TN129

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2008)09-2276-03

Numerical Simulation of Large Orbit Gyrotron Electron Beam Double CUSP Gun

Zou Feng^{①②} Xue Qian-zhong^① Liu Pu-kun^①

^①(Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

^②(Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: Theoretical model of a double cusp gun is analyzed; model of magnetic cusp is built up. By using of EGUN and MAGIC, a double cusp gun producing large orbit gyration electron beam is designed, with beam velocity ratio of 1.38 and axial velocity spread 3.7%. The distribution of electron beam velocity ratio and axial velocity spread on axis is analyzed, then the variety magnetic cusp transition length affects on beam parameters is discussed, which provides some reference for double magnetic cusp gun design.

Key words: Gyro-TWT amplifier; Electron gun; Double-cusp magnetic field; Large orbit gyrotron electron beam

1 引言

回旋行波管放大器是一种新型高功率、宽带毫米波源,在大功率毫米波雷达等方面有广阔的应用前景,越来越受到重视。高频率回旋放大器性能与电子注质量密切相关,需要对电子注速度比和引导中心等参量进行更精确的控制和调节。大轨道回旋^[1, 2]的电子注只与角向指数与谐波数相等的那些模式发生耦合,可以减少模式竞争,允许有更大的模式选择空间。同时,高次谐波降低了对相互作用磁场的要求,解决了高频率工作时磁场要求过高的问题。双磁会切电子枪^[3-6]作为新一代的回旋放大器束流形成系统,能有效产生大回旋轨道的电子注,能对电子注速度比、速度零散及引导中心进行独立的调节,极大地满足了新型毫米波回旋器件的要求。

本文分析了双磁会切电子枪的结构模型和磁场位形模型,利用粒子模拟的方法和电子轨迹计算软件设计了产生高速度比、低速度零散大回旋电子注的电子枪,并对电子注的

速度比、速度零散沿轴线的分布进行了分析。最后讨论了会切磁场变换宽度对电子注参量带来的影响。

2 理论模型

2.1 双磁会切电子枪的物理模型

双磁会切电子枪的结构及轴向磁场分布如图1所示。轴向的磁场的跳变伴随着径向较大的磁场分量 B_r ,使电子注受洛伦兹力 $v_z \times B_r$ 的作用产生角向运动,适当选择结构和磁场参量,可以使电子注经过第二磁会切后作大回旋运动。

该系统中,角向磁矢量位与角向坐标 θ 无关,电子的角向磁力矩为零,电子注满足正则角动量守恒的条件^[1, 7],即

$$P_\theta = \gamma m_0 \left[r v_\theta - \frac{1}{2} r^2 \omega_{cz}(z) \right] = C \quad (1)$$

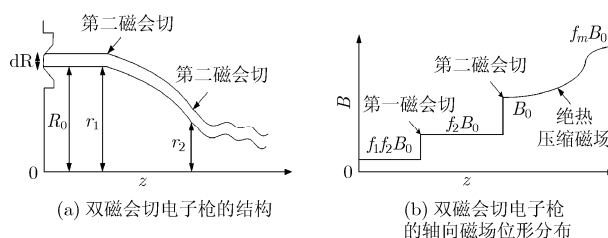


图1

2007-03-07 收到, 2007-06-01 改回

国家自然科学基金(60571039)和国家杰出青年科学基金(60125104)资助课题

式中 $\omega_{cs}(z) = eB_z(z)/\gamma m_0$ 为电子的回旋频率, $v_\theta = r\dot{\omega}$ 为电子角向速度, C 为常数, 且存在近似关系: $A_\theta = \frac{1}{2}rB_z(z)$ 。

由式(1), 可以依次对电子注经过第一、第二磁会切、绝热压缩磁场后的参量进行计算。电子注经过第二磁会切后引导中心半径为

$$r_g = \frac{1}{2}(f_1 + f_2)r_1 \quad (2)$$

式中 f_1, f_2 表示了磁会切前后磁场的比例关系, r_1 为电子在阴极处及第一个磁会切处的径向位置。由式(2)可以看出, 只需令 $f_1 = -f_2$ 既可得到大回旋轨道的电子注。

2.2 会切磁场的物理模型

理想的会切磁场可以由阶跃函数来表示, 如图 2(a)所示, $-B_1$ 和 B_2 之间的变换宽度 L 为 0。实际的会切磁场通常采用线圈中间加入软铁板的方式^[7]或者采用冲击磁铁的方式得到, 因此磁场的变换宽度不可能为 0, 而是一有限值, 如图 2(b)所示。这里采用如下函数对轴向磁场作近似计算^[8]:

$$B_z(z) = \frac{1}{2}[(B_2 - B_1) + (B_2 + B_1) \times \tanh(z/L)] \quad (3)$$

式中 B_1, B_2 分别为会切磁场跳变前后的磁场值, L 为变换宽度。与该会切磁场自恰的径向磁场可以通过级数展开后计算得到, 这里给出近似结果:

$$B_r(r, z) = \frac{-r}{4L}(B_2 + B_1)e^{-\frac{r^2}{4L^2}(z/L)^2} \quad (4)$$

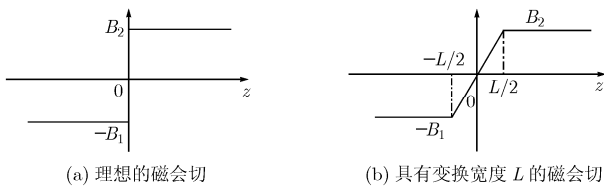


图 2

3 双磁会切电子枪的模拟与分析

3.1 双磁会切电子枪的数值模拟

依据以上讨论的磁场模型, 针对电子枪的设计要求, 设定两个磁会切变换宽度分别为 $L_1=4\text{mm}$ 和 $L_2=6\text{mm}$ 。加载的磁场分布如图 3(a)和图 3(b)所示。

利用电子轨迹模拟程序 EGUN 及 PIC 粒子模拟程序 MAGIC 进行模拟, 经过不断的优化调整, 得到了如图 4(a)

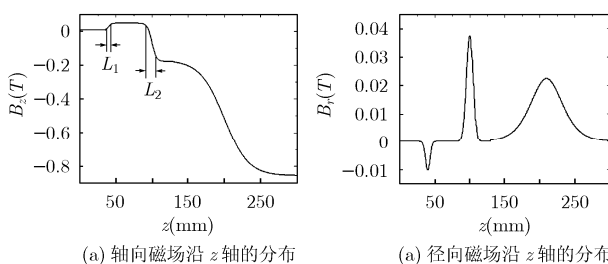


图 3

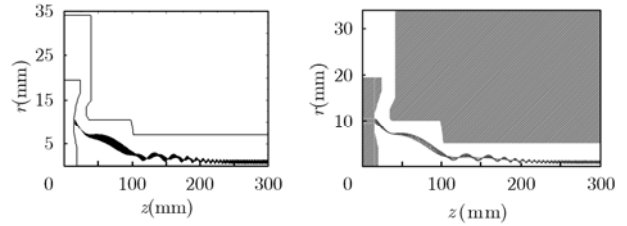


图 4

和图 4(b)所示的电子注轨迹。由图可知, 两种软件计算所得的电子注轨迹基本保持一致。电子注参量如表 1 所示。

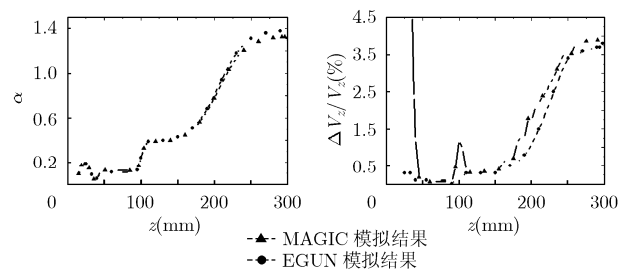
表 1 电子注的性能参量

电子注电压(kV)	80	$f_1 = -f_2$	0.2
电子注电流(A)	3.35	f_m	4.83
阴极发射密度(A·cm ⁻²)	5	阴极区磁场(T)	0.0065
相互作用区磁场(T)	0.86	第一磁会切变换宽度(mm)	4
阴极半径(mm)	10	第二磁会切变换宽度(mm)	6
阴极发射面宽度(mm)	1		
速度比	1.38	轴向速度零散(%)	3.7
引导中心半径(mm)	0.73	拉莫尔半径(mm)	0.89

由表 1 可以看出, 该双磁会切电子枪产生的电子注基本能满足 Ka 波段二次谐波回旋行波管放大器对电子注质量的要求。

3.2 模拟结果分析

电子注速度比和轴向速度零散沿轴线的分布如图 5(a)和图 5(b)所示。由图 5(a)可以看出, 除了在绝热压缩区后 EGUN 模拟的结果略微偏大外, 采用粒子模拟的结果与电子轨迹计算软件计算的结果十分接近, 可以认为结果是准确的。由图 5(b)可以看出, 计算所得的电子注轴向速度零散的变化趋势基本相同, 均在有径向磁场存在的地方有所增加, 在绝热压缩段增加的幅度较大。在第二磁会切的地方, 采用



(a) 电子注速度比沿 z 轴的分布 (b) 电子注轴向速度零散沿 z 轴的分布

图 5

MAGIC 模拟的结果明显存在一个上升下降的过程, 但用 EGUN 模拟的结果看不到这一变化。这一变化过程是由于在第二磁会切处有较大的径向磁场作用于电子注, 电子受洛仑兹力作用不同所导致的。这表明粒子模拟比电子轨迹计算软件在描述粒子统计特性方面更为精细。

图 6(a)和图 6(b)给出了在保持第二磁会切变换宽度 $L_2=6\text{mm}$ 不变、不同第一磁会切变换宽度 L_1 情形下电子注速度比、速度零散沿轴线的分布。由图 6(a)可以看出, L_1 的变化对速度比的影响不大, 其变化趋势基本保持一致。由图 6(b)可以看出, 电子注在进入绝热压缩段之前速度零散基本相同, 在绝热压缩段速度零散出现较大的不同, 说明第一磁会切的变换宽度对电子注的速度零散影响较大。在磁位形设计时应根据整管对电子注轴向速度零散的要求对第一磁会切变换宽度进行选择。

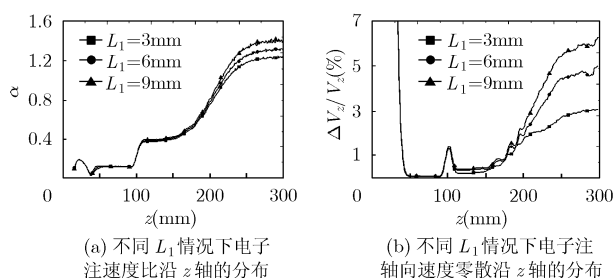


图 6

图 7(a)和图 7(b)给出了在保持第一磁会切变换宽度 $L_1=4\text{mm}$ 不变、不同第二磁会切变换宽度 L_2 情形下电子注速度比和速度零散沿轴线的分布。由图 7(a)可以看出, 电子注速度比在第二磁会切处出现差别, 经过绝热压缩后差别较大。电子注的角向运动主要由洛仑兹力 $v_z \times B_r$ 作用引入角向运动, 第二磁会切处不同的速度比表明同一位置上电子注的轴向速度不同, 因而受到的作用力也不同, 经过绝热压缩磁场的作用后, 电子注速度比必定出现较大的差别。由图 7(b)可以看出, 电子注在第二磁会切处的速度零散差别较大, 在通过绝热压缩磁场的过程中速度零散发生更大的偏离。有两方面的原因: (1)不同径向位置的径向磁场不同, 导致电子注受到的角向洛仑兹力不同, 电子注速度零散大; (2)同一位置处电子注速度比不同, 即电子注的轴向速度 v_z 不同, 其所受角向洛仑兹力则不一样, 导致速度零散增大。可以看到, 第二磁会切的变换宽度对电子注的速度比、轴向速度零散都有较大的影响, 但整管要求速度比尽可能大, 而速度零散应尽可能小, 设计时应结合整管对电子注速度比和轴向速度零散的具体要求综合进行选择。

4 结束语

本文分析了双磁会切电子枪的结构模型, 建立了会切磁场的理论模型, 采用电子轨迹模拟软件 EGUN 和 PIC 粒子模拟软件 MAGIC 设计了产生速度比为 1.38, 速度零散为

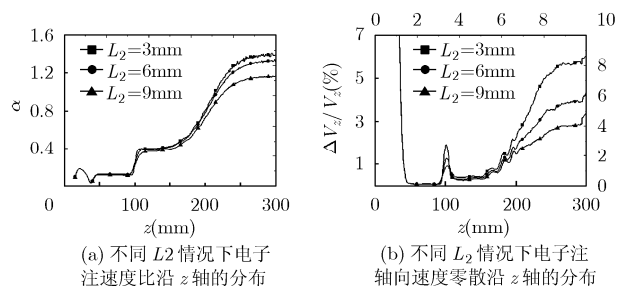


图 7

3.7%, 大回旋电子注的双磁会切电子枪, 该枪适用于 Ka 波段二次谐波回旋行波管放大器。分析了电子注的速度比、速度零散沿轴线的分布情况, 并对两会切磁场变换宽度对电子注性能参量的影响进行了讨论。模拟结果表明, 第一磁会切变换宽度对电子注的轴向速度零散影响较大, 第二磁会切变换宽度对电子注速度比和速度零散均有较大影响, 设计时应结合整管对电子注的要求合理选择。

参考文献

- [1] Lawson W and Latham P E. The design of a small-orbit/large-orbit gyrokystron experiment [J]. *J. Appl. Phys.*, 1987, 61(2): 519-528.
- [2] Zapevalov V, Idehara T, and Sabc S, *et al.*. Design of a large orbit gyrotron with a permanent magnetic system[J]. *International Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2003, 24(3): 253-260.
- [3] Jeon S G, Baik C W, and Kim D H, *et al.*. Analysis of axis-encircling electron beam using a single-cusp magnetic field[J]. *Jpn. J. Appl. Phys.* 2002, 41: 5404-5407.
- [4] Jeon S G, Baik C W, and Kim D H, *et al.*. Experimental verification of low-velocity spread axis-encircling electron beam[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2004, 84(11): 1994-1996.
- [5] Gallagher D A, Barsanti M, and Scafuri F, *et al.*. High-power cusp gun for harmonic gyro-device applications[J]. *IEEE Trans. on Plasma Science*, 2000, 28(3): 695-699.
- [6] Nguyen K T, Smithe D N, and Ludeking L D. The double-cusp gyro-gun[C]. Electron Device Meeting, 1992: 219-222.
- [7] Rhee M J and Destler W W. Relativistic electron dynamics in a cusped magnetic field[J]. *Phys. Fluids*, 1974, 17(8): 1574-1581.
- [8] Sabchevski S, Idehara T, and Ogawa I, *et al.*. Computer simulation of axis-encircling beams generated by an electron gun with a permanent magnetic system[J]. *International Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2000, 21(8): 1191-1209.

邹峰: 男, 1983年生, 硕士生, 从事大功率微波毫米波器件的研究。

薛谦忠: 男, 1962年生, 博士, 副研究员, 主要从事高功率微波与毫米波领域的研究工作。

刘濮鲲: 男, 1965年生, 研究员, 博士生导师, 主要从事高功率微波与毫米波领域的研究。