

相对论速调管中调制腔的三维设计

廖旭, 任学藻, 李正红

(西南科技大学理学院 四川 绵阳 621010)

【摘要】根据二维模拟中电子束在调制腔中所需要的微波场,采用三维电磁场模拟软件进行调制腔的三维设计。在相对论速调管放大器中输入微波的馈入调制腔内,其作用场为 TM_{01} 模;由于调制腔需要从外部馈入微波,通常为一种较复杂的三维结构。通过三维带电子束的电磁场模拟,验证了三维设计调制腔在给定输入功率条件下对电子束的调制效率及其三维设计。

关键词 放大器; 调制腔; 电磁场模拟; 相对论速调管

中图分类号 TN102

文献标识码 A

doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2011.02.012

Three Dimensional Design of a Modulation Cavity for a Relativistic Klystron Amplifier

LIAO Xu, REN Xue-zao, and LI Zheng-hong

(Science College, South-Western University of Science and Technology Mianyang Sichuan 621010)

Abstract In the paper, the “cold” cavity is designed by a 3D electromagnetic software to provide the corresponding radio frequency (RF) field, which is required in the 2D particle in cell (PIC) simulation (with the electron beam). Though the rf field is TM_{01} mode in the modulation cavity in a relativistic klystron amplifier, the structure of the cavity is the 3D one because a special connection is needed between the seeding rf source and the cavity. So the 3D design of a modulation cavity is necessary. The designed cavity is tested in the 3D PIC simulation, then the electron beam is modulated in the cavity, and the modulation can meet the requirement for the 2D PIC simulation.

Key words amplifier; modulation cavity; particle in cell simulation; relativistic klystron

在HPM器件研究中,由于微波器件物理、工艺和脉冲技术工程的限制,单个微波器件的微波输出功率受到理论限制(~ 10 GW)。要发展超过该限制的HPM发生器,功率合成成为可行的技术路线,放大器即是有效实现功率合成的微波器件。因此,随着HPM的发展,放大器类的HPM器件越来越重要。在HPM器件中有磁控管、返波管(BWO)^[1]、行波管(TWT)^[2]、回旋管、虚阴极振荡器(VCO)^[3]、相对论速调管(RKA)^[4]和渡越振荡管^[5]等器件,其中相对论速调管(RKA)^[4]是一种重要、较典型的放大器^[6-7]。

在相对论速调管放大器中,输入微波在调制腔作用间歇激发起相应微波场,实现对电子束的调制。由于相对论速调管放大器中电子束同 TM_{01} 模作用,通常的PIC模拟为2D结构。2D PIC模拟不仅运算快,而且可以采用很细的网格深入研究器件的束波互作用过程;而3D PIC模拟运算慢,尤其针对很细的网格,很难采用3D PIC模拟深入研究器件的束波互

用过程。由于调制腔为一种较为复杂的3D结构,需要从外部馈入微波,在作用间歇产生电子束需要的微波场,其模式通常为 TM_{01} 模。本文根据2D PIC模拟电子束在调制腔中所需要的微波场,采用3D电磁场模拟软件进行调制腔的3D设计,并进行3D PIC模拟,验证调制腔在给定的输入功率条件下对电子束的调制效率。

1 三腔速调管的结构

三腔速调管的结构^[8-9]如图1所示。电子束从阴极发射后,通过调制腔,受到调制腔中微波场的作用,电子速度得到调制;经过一段漂移后,电子束开始群聚(即密度调制);当这种弱调制的电子束通过中间腔时,会在中间腔激发起较强的微波场,对电子束实现更进一步的调制;最后通过输出腔,激发起相应的微波场,并与之相互作用,将电子动能转化为微波,从输出口输出。

收稿日期: 2009-06-05; 修回日期: 2009-11-27

基金项目: 国家自然科学基金(10347009); 四川省教育厅重点科研资助(09ZA128)

作者简介: 廖旭(1961-), 男, 副教授, 主要从事电磁场及微波理论方面的研究。

在一定条件下，微波输出功率^[10-11]为：

$$P = \frac{i}{2} I_0 V_0 \quad (1)$$

式中， i 为电子束进入输出腔时电子束调制谐波分量； I_0 为电子束平均电流强度； eV_0 为电子能量。

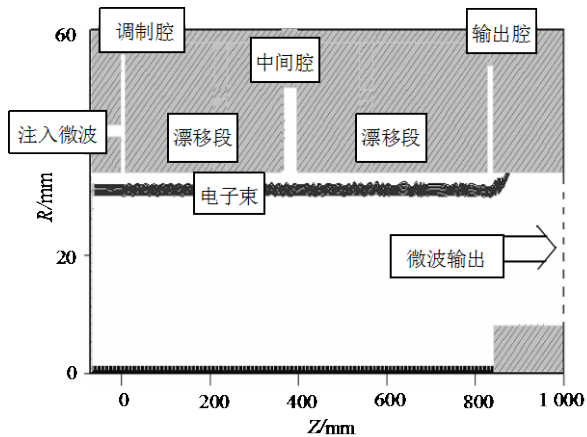


图1 带一个中间腔的速调管结构

在图1的结构中，当注入微波功率为429 kW时，调制腔的间歇作用电压为24 kV，在中间腔($z=30$ cm)处，电子束调制深度约为11%；在中间腔作用间歇激发的间歇作用电压为240 kV。电子束调制深度在输出腔处达到最大，然后在输出腔产生需要的高功率微波。该结构的模拟微波输出功率为1.1 GW，器件的放大倍数为 2.56×10^3 。

2 电子束调制对调制腔的要求

电子通过调制腔时，速度受到调制，在漂移段逐步转化为密度调制。电子在漂移段中的运动可以用电子相对于微波场的相位表示为：

$$\frac{d}{dz} \varphi = \frac{\omega}{v} \quad (2)$$

式中， ω 为微波角频率； v 为电子运动速度。

式(2)的近似解为：

$$\varphi \approx \varphi_0 + \frac{\omega}{v_0} z - \frac{\omega}{v_0} z k_1 \sin\left(\varphi_0 + \frac{\varphi_0}{2}\right) \quad (3)$$

式中， $k_1 \approx \frac{V}{2V_0}$ ； $V \approx V_1 M_1(\theta_0)$ ，其中， V_1 为调制腔的间歇作用电压， $M_1(\theta)$ 为调制腔同电子束之间的耦合， θ_0 为电子在调制腔的渡越角。电子束在漂移段的调制谐波分量为：

$$i_1(z) = 2J_1\left(\frac{\omega}{v_0} k_1 z\right) \quad (4)$$

在距离调制腔 $z = L$ 位置处，电子束基次谐波分量为：

$$i_1 = 2J_1\left(\frac{\omega}{v_0} k_1 L\right) \quad (5)$$

当电子束的调制深度为10%时，要求 $\frac{\omega}{v_0} k_1 L = 0.05$ ，则调制腔的间歇作用电压为：

$$V = \frac{0.05}{\pi} V_0 \beta_0 \frac{\lambda}{L} \quad (6)$$

式中， λ 为微波波长； β 为电子初始相对论因子。

调制腔的2D PIC模拟结构如图2所示。当注入微波功率10.16 kW、调制腔微波储能为35.4 μ J、结构谐振频率为2.80 GHz、间歇作用电压为3.78 kV时，可得微波腔的互作用阻抗 $Z=1\ 407\ \Omega$ 。当 $V_0 = 600$ kV、 $\lambda = 10.7$ cm、 $L = 30$ cm、 $\beta_0 = 0.9$ 时，要求间歇作用电压为24 kV，则结构要求的注入微波功率为429 kW。当注入微波功率429 kW时，电子束调制深度在图2结构中随传输距离的变化曲线如图3所示。由图3可以看出，电子束的调制深度达到10%，满足图1结构中电子束的要求。

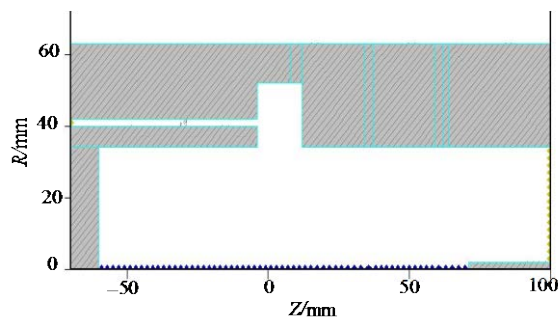


图2 调制腔的2D PIC模拟结构

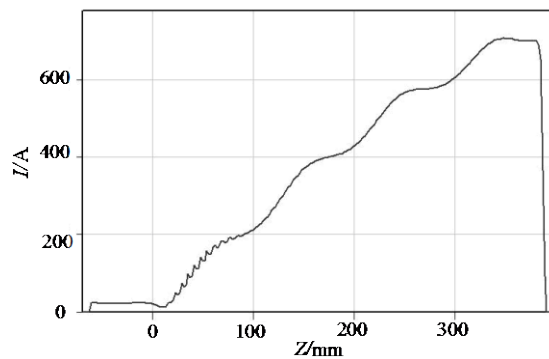


图3 电子束调制电流在图2结构中随传输距离的变化曲线

3 3D电磁模拟软件对2D模拟结构的模拟分析

利用PIC模拟软件和3D电磁模拟软件，通过对相同结构进行模拟分析，可以有效地将两种软件结合。在3D电磁模拟软件中的2D PIC模拟结构如图4

所示。结构谐振频率为 2.80 GHz、注入微波为 1 W 时, 参考观察点处激励微波强度 $E_z = 1.608 \text{ kV/m}$, 由此可得谐振时参考观察点处激励微波场与注入微波的关系为^[12-13]:

$$E_z = 1.608\sqrt{2P_{in}}$$

式中, P_{in} 为微波注入功率。

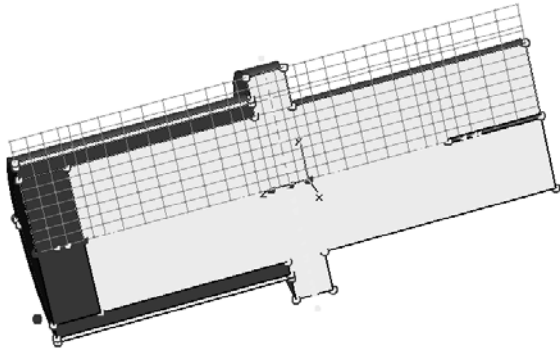


图4 3D电磁模拟软件中的2D PIC模拟结构

谐振时作用间歇微波场分布如图5所示。注入微波为 1 W 时, 间歇作用电压为 $v = 29.0 \text{ V}$, 由此可得结构相互作用阻抗 $Z = \frac{2V^2}{P_{in}} = 1407 \Omega$ 。

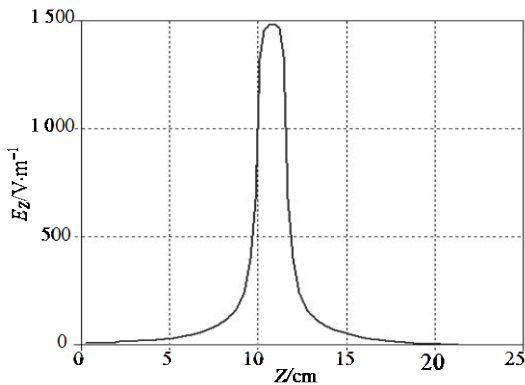


图5 谐振时作用间歇微波场分布

4 3D电磁模拟软件的3D结构设计

调制腔3D结构如图6所示。结构谐振频率为 2.80 GHz、 $P_{in} = 1 \text{ W}$ 时, 参考观察点处激励微波场强度 $E_z = 1.807 \text{ kV/m}$, 由此可得谐振时参考观察点处激励微波场与注入微波的关系为^[14-15]:

$$E_z = 1.807\sqrt{2P_{in}}$$

当微波注入功率为 1 W 时, 间歇作用电压为 $v = 28.0 \text{ V}$, 由此可得结构相互作用阻抗 $Z = 1568 \Omega$ 。当微波注入功率为 315 kW 时, 作用区间歇作用电压达到图1结构要求的 24 kV, 注入功率低于图1的结构, 这是由于3D结构(见图6)中, 耦合连接使整个调制腔结构的Q值高于2D结构(见图2)。

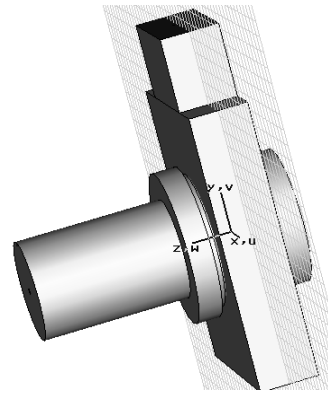


图6 调制腔3D结构

5 3D PIC模拟

2D调制腔的3D PIC模拟结构如图7所示。微波注入功率 315 kW, 谐振时参考观察点处微波场z向场强为 $E_z = 4.18 \text{ MV/m}$, 间歇作用电压为 24 kV, 由此可得微波腔的相互作用阻抗 $Z = 1568 \Omega$ 。微波注入功率为 315 kW 时, 电子束调制深度在图7结构中随传输距离的变化曲线如图8所示。由图可以看出, 电子束的调制深度达到 10%, 满足图1结构中电子束的要求。

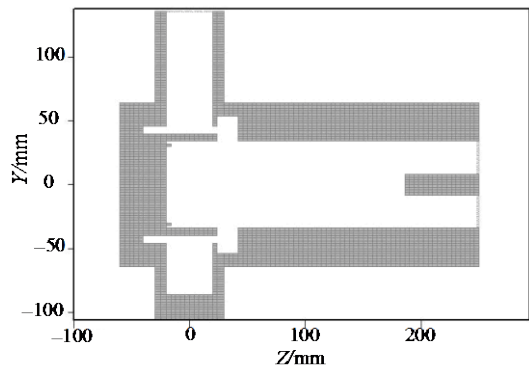


图7 3D调制腔的3D PIC模拟结构

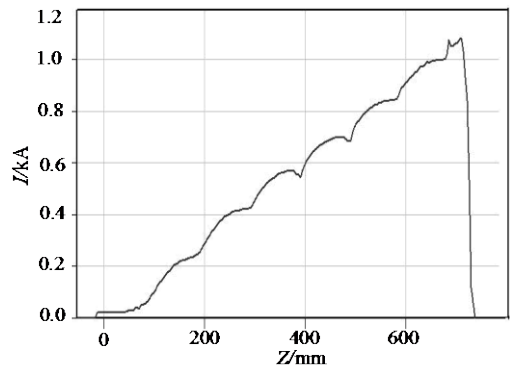


图8 电子束调制电流在图7结构中随传输距离的变化曲线

6 结论

在相对论速调管放大器的研究设计中, 本文根据 2D PIC 模拟中电子束在调制腔中所需要的微波

场,采用3D电磁场模拟软件进行调制腔的3D设计,并进行3D PIC模拟,验证调制腔在给定输入功率条件下对电子束的调制效率。同时,由于3D结构中的耦合连接使整个调制腔结构的 Q 值高于2D结构,相应结构的相互作用阻抗也较高。比较图7和图8可以看出,在3D PIC模拟中,相同电子束调制要求的注入功率也较低。考虑到2D PIC模拟运算快,可以采用细网格准确反映束腔相互作用的物理过程,将其与3D电磁场模拟结合可以有效地研究和设计3D结构的调制腔,从而克服3D PIC模拟中运算时间长、运算精度相对较低等缺点。

参 考 文 献

- [1] LI Z H. Investigation of an over-sized BWO as an X-band high power microwave generator[J]. Appl Phys Lett, 2008, 92, (5): 1-3.
- [2] ZHENG Q, XIE F, LIN W. Solution of three-dimensional Helmholtz equation by multiple theory method[J]. Electronmagn Waves Appl, 1999, 13(3): 339-357.
- [3] LI Z H. Beam-loaded frequency shift in the high power microwave oscillator Bitron[J]. Physics of Plasma, 2009, 16, (2): 1-4.
- [4] LI Z H, YU Q. Mode control in an over-sized backward wave oscillator[J]. Physics of Plasma, 2008, 15, 093104: 1-6.
- [5] FAZIO M V. A 500 MW, 1 μ s pulse length high current RKA[J]. IEEE Trans Plasma Sci, 1994, 22(5): 740-74
- [6] KOROVIN S D, ROSTOV V V, POLEVIN S D. High power microwave sources[J]. Proceedings of IEEE, 2004, 92(7): 1082-1088.
- [7] AGEE F J. Intense pulse power[J]. SPIE on Intense Microwave Pulse, 1999, 3702(6): 2-11.
- [8] 李正红, 黄华, 常安璧. 两腔高功率微波振荡器研究[J]. 物理学报, 2008, 57(8): 1564-1570.
LI Zheng-hong, HUA Hua, CHANG An-bi. Investigation of bitron as a high power microwave oscillator[J]. Acta Phys Sin, 2005, 54(4): 1564-1570.
- [9] 杨振萍, 李正红. 相对论速调管放大器中微波的相位抖动研究[J]. 物理学报, 2008, 57(8): 2627-2632.
YANG Zhen-ping, LI Zheng-hong. Investigation of RF phase jitter in relativistic klystron amplifier[J]. Acta Phys Sin, 2008, 57(8): 2627-2632.
- [10] 朱敏, 吴鸿适. 速调管双重入式柱形腔的计算[J]. 电子学报, 1987, (4): 8-15.
ZHU Min, WU Hong-shi. Calculation of bi-entrant cavity's klystron[J]. Acta Electronica Sinica, 1987, (4): 8-15.
- [11] 吴宏适. 微波电子学[M]. 北京: 科学出版社, 1986.
WU Hong-shi. Microwave electronics[M]. Beijing: Science Press, 1986.
- [12] CARLSTEN B E, HAYNES W B. Discrete monotron oscillator[J]. IEEE Trans on Plasma Sci, 1996, 24(4): 1249-1254.
- [13] HAN S U, HENDRICKS K J, ARMAN M J, et al. A nonlinear theory of relativistic klystrons connected to a coaxial waveguide[J]. Physics of Plasmas, 1997, 4(7): 2691-2696.
- [14] CLARLSTEN B E, ROYBAL W T. Modifications to harmonic current bunching of electron beams from rf cavities due to radial boundary conditions[J]. IEEE Trans on Electron Devices, 2005, 52(12): 2791-2799.
- [15] NUSINOVICH G M. Excitation of monotronoscillations in klystrons[J]. Physics of Plasma, 2004, 11(11): 4893-4903.

编辑 黄 莘