2018年10月

Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology

文章编号: 2095-4980(2018)05-0772-04

TE22,6 模式—高斯波的准光模式转换器设计

刘本田,张 杨,张亦弛,李志良,冯进军

(中国电子科技集团公司 第十二研究所 微波电真空器件国家级重点实验室,北京 100015)

摘 要: 准光模式转换器是高功率毫米波回旋管的重要组成部份,能够实现电磁波与电子注的分离、隔离波的反射,并实现回旋管的高斯波束输出。基于耦合波理论,分析设计出用于频率140 GHz、TE_{22.6}模式回旋管的 Denisov 辐射器;基于几何光学理论,设计出准光反射镜面系统,并采用 Feko 软件进行优化。计算结果表明,所设计的准光模式转换器系统的转换效率约为 97.3%, 波束的高斯含量约为 93.3%,达到了回旋管的应用需求。

 关键词:回旋管;高斯波束;磁约束核聚变;国际热核聚变实验反应堆;毫米波

 中图分类号:TN129
 文献标志码:A

 doi:10.11805/TKYDA201805.0772

Optimized design of quasi-optical mode converter for TE_{22.6}-mode to Gaussian beam

LIU Bentian, ZHANG Yang, ZHANG Yichi, LI Zhiliang, FENG Jinjun

(National Key Laboratory of Science and Technology on Vacuum Electronics, Beijing Vacuum Electronics Research Institute, Beijing 100015, China)

Abstract: The quasi-optical mode converter is the main part of the high-power millimeter wave gyrotron. The converter can separate the electron beam and electromagnetic wave, reduce the reflecting microwave into the high-frequency cavity, and realize the output of transversal Gaussian beam. The Denisov launcher for 140 GHz, TE_{22.6}-mode gyrotron has been analyzed and designed according to the mode coupling theory. And the reflecting mirrors have been designed with the geometrical optics theory and optimized by Feko simulation. According to the calculation results, the conversion efficiency of electromagnetic energy is 97.3% and the Gaussian content of output wave-beam is 93.3% for the quasi-optical mode converter, which can meet the requirements of the gyrotrons.

Keywords: gyrotron; Gaussian beam; nuclear fusion; International Thermonuclear Experimental Reactor(ITER); millimeter wave

随着世界人口不断增加与经济持续发展,日益增长的能源需求导致能源供给不足、地球环境不断恶化等诸多问题,因此作为一种储存丰富、无污染的清洁能源,核聚变能将在未来几十年内呈现在人类面前。核聚变反应需要的等离子体温度高达1亿度左右。为使等离子体达到如此高温,核聚变实验堆需同时采用多种形式的加热方式,如低混杂波电流驱动(Lower Hybrid Current Drive,LHCD)^[1],中性束注入(Neutral Beam Injection,NBI)加热技术^[2]、电子回旋共振加热(Electron Cyclotron Resonance Heating,ECRH)技术^[3]等,其中电子回旋共振加热(ECRH)是目前最有效的加热方式之一,而高功率回旋管器件^[4-6]是 ECRH 的最佳微波功率源。随着回旋管的输出功率提高,其高频结构不断增大,并工作于高阶模式,以降低壁损耗,提高高频腔的功率容量,而高阶模式在传输过程中呈空心状,存在严重的绕射和反射损耗,不利于在自由空间中直接传输和辐射,微波功率无法有效馈入核聚变实验堆,因此高功率回旋管^[7-9]需要采用模式变换技术,将高阶模式转换为利于空间传输的低阶模式或利于波纹波导传输的高斯模式。常规的波导模式变换主要用于低阶模式的变换,若对高阶模式变换则其结构复杂,效率低,带宽窄,目前只有准光模式转换器能够实现高阶模式的高效转换。准光模式转换器^[10-11]采用开敞式结构,主要由辐射器和波束调节镜面构成,通过调整辐射波束空间场分布的途径实现模式变换,具有功率容量高,反射功

收稿日期: 2017-07-20; 修回日期: 2017-09-05 基金项目: 国家磁约束核聚变能发展研究资助项目(2017YFE0300203) 率小的优点。辐射器分为 Vlasov 型和 Denisov 型 2 种,其中 Vlasov 型辐射器因沿螺旋形切口处场强比较大,造成绕射损耗比较大,转换效率比较低;而 Denisov 型辐射器由不规则波纹波导和螺旋形切口组成,不规则波导将输入高阶边廊模式转换成一系列模式的混合进行预聚束,预先实现了准高斯波束分布,减小了切口处场强,因而绕射损耗小,转换效率高。

本文针对我国磁约束核聚变实验装置(Experimental Advanced Superconducting Tokamak, EAST)系统所用兆瓦级 140 GHz 回旋管^[12]的需求,通过分析 Denisov 型辐射器以及镜面系统的工作原理,优化各部分的结构参数,设计出工作频率在 140 GHz, TE_{22.6}模式的准光模式转换器系统。该系统由 Denisov 型辐射器和 1 个准椭圆柱面镜、2 个相位校正镜构成,实现了回旋管工作模式与基模高斯波束 TEM₀₀之间的有效转换。

1 Denisov 型辐射器的分析与设计

Denisov 模式转换器的基本原理是通过在圆波导内壁上加入周期性的扰动,可以将 TE_{m,n}模式定向耦合至成 对出现的卫星模式(如 TE_{m,n±1}),其与主模一起,近似构成高斯的等效表面电流分布,耦合出其他模式,通过控制 各个耦合模式的幅度和相位,合成近高斯模。

根据模式耦合理论,在角向和纵向同时加入微扰,以产生高斯波束。波纹波导的结构为:

$$R(\phi, z) = a + \alpha z + \delta_1(z) \cos\left(\Delta\beta_1 z - l_1\phi\right) + \delta_2(z) \cos\left(\Delta\beta_2 z - l_2\phi\right) \tag{1}$$

式中: *a* 为波纹波导入口处的半径; ϕ 为角向变量,取值范围 0~2 π ; $l_1=1, l_2 = \Delta m = 3$; $\Delta \beta_1 = (\sqrt{k_{Zm,n-1}} - \sqrt{k_{Zm,n+1}})/2$ 为纵向的相位差, $k_{Zm,n}$ 为圆波导 TE_{m,n}模式的传播常数; $\Delta \beta_2 = ((\sqrt{k_{Zm+\Delta m,n-1}} - \sqrt{k_{Zm,n}}) + (\sqrt{k_{Zm-\Delta m,n+1}} - \sqrt{k_{Zm,n}}))/2 为角向的相位差; <math>\delta_1, \delta_2$ 分别为纵向和角向扰动幅度; α 为辐射器张角的斜率,在各扰动参数之中,依据各卫星模式的选择准则,引入 α -方面可以抑制电子注在辐射器内产生寄生振荡,另一方面也可减少辐射器内表面扰动所产生的反射现象,通常取 $\alpha = 0.002$ 。在设计中, $\Delta \beta_h$ 可以在上述参考值基础上微调,而扰动幅度 $\delta_h(z)$ 则是主要的设计量。设计目标是通过合适的扰动,将 TE_{m,n}模式的能量按适当的比例耦合至各个卫星模式,如表 1 所示。然而,发生耦合时会对卫星模引入 $\pi/2$ 的相位,各模式需要传播一段距离才能相位匹配,达到近似高斯的表面电流分布,

即 Denisov 辐射器可认为由扰动段、相位匹 配段、辐射切口组成。

对于 TE_{22,6} 模式而言, 扰动($\delta_1, \Delta \beta_1, l_1$)用 来耦合出 TE_{21,6}, TE_{23,6} 模式, 在 z 轴向形成类 高 斯 分 布 ; 扰 动 ($\delta_2, \Delta \beta_2, l_2$)将 耦 合 出 TE_{19,7}, TE_{25,5} 模式, 在 ϕ 向形成类高斯分布。 根据几何光学理论和模式耦合理论编写了数 表 1 合成高斯场分布的各卫星模式及其携带的相对功率 Table1 A Gaussian-like field distribution generated by a set of TE modes with relative power

	ϕ azimuthal bunching		
Z azimuthal bunching	$TE_{m-2,n+1}(1/36)$	$TE_{m+1,n}(1/9)$	$TE_{m+4,n-1}(1/36)$
	$TE_{m-3,n+1}(1/9)$	$TE_{m,n}(4/9)$	$TE_{m+3,n-1}(1/9)$
	$TE_{m-4,n+1}(1/36)$	$TE_{m-1,n}(1/9)$	$TE_{m+2,n-1}(1/36)$

值程序,采用设计参数为: 半径 *a*=16.8 mm, 扰动 1 强度(δ₁)为 0.058 mm, 扰动 2 强度(δ₂)为 0.047 mm, 切口高 度为 35.433 mm, 通过数值分析计算得到较好设计结果,计算的各模式相对功率大小如图 1 所示。主模功率为 44.14%(约为 4/9), 其他卫星模式的功率也基本满足表 1 中所示。



Fig.1 Wall deformation of Denisov launcher and mode composition(relative power) coefficients vary along the z-axis of the launcher for TE_{22,6} mode 图 1 Denisov 辐射器的扰动幅度情况及各模式功率变化曲线 主模式经过辐射器内壁扰动后,逐渐产生卫星模式并形成高斯束斑,高斯场分布图展开如图2所示,其中斜线为螺旋形切口,切口后的菱形区域为布里渊区。由图2看出,所设计的 Denisov 辐射器在辐射端口形成了较好的高斯束斑,有利于微波的定向辐射,降低散射损耗。设计的 Denisov 辐射器的切口边沿壁电流很小(如图2所示),从而减少了辐射器内电磁波束向周围的散射,这对于波束的预聚束起到很好的效果,并提高了系统的转换效率。 通过分析计算,所设计 Denisov 辐射器壁电流分布情况数值计算结果与仿真结果基本吻合,功率转换效率达到了 99.8%。



2 准光反射镜面系统设计

准光反射镜面系统主要由准椭圆柱面 镜和相位调节镜构成,对辐射器输出的准高 斯波束进行方向调节和波束汇聚,最终实现 回旋管工作模式到高斯波束的高效转换和

表 2 模式转换器各部件口面场的功率比率						
Table2 Relative power on the parts of the mode converter						
incidence field	transmit field	reflect field1	reflect field2	radiation field		
606.6	604.8	599.3	591.6	590.3		
100%	99.7%	98.8%	97.5%	97.3%		

定向输出。准光模式转换器系统的构成及限制空间如图 3(a)所示,在此空间设计要求下,设计1号镜的次级焦距 在 1,2号镜之间;2号镜的次级焦距在 2,3号镜之间,3号镜兼具水平和竖直 2个维度的汇聚功能。采用数值计算 和电磁仿真软件仿真,所获得的反射镜镜面的壁电流和空间模式的转换过程如图 3(b)所示。图 4 给出了在输出窗 处高斯束斑与理想高斯波束的对比情况。表 2 给出了所设计准光模式转换器的辐射器和反射镜的场能量转换效率 计算结果。



Fig.4 Amplitude and phase comparison of launched beam wave with Gaussian beam wave 图 4 出射波束的幅相分布与高斯基模对比

通过理论分析和优化计算,所设计的准光模式变换实现了圆波导 TE_{22,6}模式转化为横向输出的高斯波束,能 量转换器效率为 97.3%。通过对出射面的主极化场分布与高斯基模参考分布进行了对比计算可知,波束的标量耦 合系数 C₀(等效波束束腰半 11.5 mm)约为 98%,矢量转换效率 C₁约为 93.3%。在输出窗口处得到的场分布无论是 场强度还是相位分布,数值仿真结果和电磁仿真结果基本一致。

综合分析,所设计的准光模式转换器通过 Denisov 辐射器和三面镜面的聚束和相位校正,在输出窗口处得到 高斯含量很高的高斯分布,能量转换效率大于 95%的设计目标,完全可满足回旋管设计的要求。

3 结论

针对 140 GHz,TE_{22,6}模式回旋管的应用需求,本文根据模式耦合理论,分析设计出用于圆波导高阶旋转模式 的模式转换相关计算方程;利用自编程序,对 Denisov 辐射器进行了优化设计和计算,实现了准高斯波束的定向 辐射。采用几何光学理论,优化设计出三面准光反射镜面系统,在回旋管输出窗口处实现了高斯波束的横向输出, 并进行了数值计算和电磁仿真。优化设计出的准光模式转换器系统实现了高频场能量转换效率 97.3%,波束高斯 含量约为 93.3%的结果,达到了回旋管的应用要求。

参考文献:

- [1] 曾浩,白兴宇,陈罡宇. HL-2A 装置低杂波天线 TE₁₀模过渡段设计[J]. 核聚变与等离子体物理, 2011,31(1):48-52.
 (ZENG Hao,BAI Xingyu,CHEN Gangyu. Design of TE₁₀ taper in the LHCD antenna for HL-2A tokamak[J]. Nuclear Fusion and Plasma Physics, 2011,31(1):48-52.)
- [2] 李昊. EAST 中性束注入实验分析研究[D]. 合肥:中国科学技术大学, 2015. (LI Hao. The study of neutral beam injection experiments on EAST[D]. Hefei, China: University of Science and Technology of China, 2015.)
- [3] WANG X J,LIU F K,SHAN J F,et al. Status of ECRH project on EAST Tokamak[J]. AIP Conference Proceeding, 2014, 1580(1):538-541.
- [4] THUMM M. State of the art of high power gyro-devices and free electron masers, update 2015[Z]. Kanpur Inst. Technol., Karlsruhe, Germany, Sci., 2016:19-31.
- [5] DAMMERTZ G, BRAUCE H, ERCKMANN V, et al. Progress in the 10 MW ECRH system for the stellator W7-X[J]. IEEE Trans. Plasma Sci., 2004,32(1):144-151.
- [6] THUMM M,YANG Xiaokang,ARNOLD Andreas, et al. A high-efficiency quasi-optical mode converter for a 140 GHz 1 MW CW gyrotron[J]. IEEE Trans. Electron Devices, 2005,52(5):818-824.
- BLANK M,FELCH K,BORCHARD P,et al. Demonstration of a high-power long-pulse 140 GHz gyroton oscillator[J]. IEEE Trans. Plasma Sci., 2004,32(3):867-876.
- [8] BLANK M, KREISCHER K, TEMKIN R J. Theoretical and experimental investigation of a quasi-optical mode converter for a 110 GHz gyrotron[J]. IEEE Trans. Plasma Sci., 1996, 24(3):1058-1066.
- [9] LIU Diwei, WANG Wei, ZHUANG Qianmeng, et al. Theoretical and experimental investigations on the quasi-optical mode converter for apulsed Terahertz gyrotron[J]. IEEE Trans. Device Letters, 2015, 36(2):195-197.
- [10] JIN Jianbo, FLAMM Jens, JELONNEK John, et. al. High-efficiency quasi-optical mode converter for a 1 MW TE32,9 mode gyrotron[J]. IEEE Trans. Plasma Sci., 2013,41(10):144-151.
- [11] THUMM M. High-power millimeter-wave mode converters in overmoded circular waveguides using periodic wall perturbations[J]. Int. J. of Electronics, 1984,57(6):1225-1246.
- [12] LIU Bentian, FENG Jinjun, LI Zhiliang, et al. Design and experimental study of a high power 140 GHz, TE_{22.6} mode gyrotron for EAST[J]. Terahertz Science and Technology, 2016,9(4):131-140.

作者简介:



刘本田(1971-),男,河南省安阳市人,博 士,研究员,主要研究方向为高功率微波、毫 米波与太赫兹回旋管器件.email:liubentian@ aliyun.com.

冯进军(1966-),男,山西省运城市人,博士,研究员, 主要研究方向为真空电子器件、真空微电子器件,毫米波行 波管、空间行波管、高功率回旋器件和太赫兹真空辐射源等. **张** 扬(1989-),男,山西省大同市人,助理工 程师,主要研究方向为高功率微波、毫米波与太赫 兹回旋管器件.

张亦弛(1991-),男,天津市人,硕士,助理工 程师,主要研究方向为高功率微波、毫米波与太赫 兹回旋管器件.

李志良(1979-),男,安徽省宿州市人,硕士, 高级工程师,主要研究方向为高功率微波、毫米波 与太赫兹回旋管器件.