

94 GHz 回旋管准光模式变换器设计*

刘建卫 赵青[†] 李宏福

(电子科技大学高能电子学研究所, 成都 610054)

(2010 年 12 月 24 日收到; 2011 年 1 月 6 日收到修改稿)

基于几何光学理论和矢量绕射理论, 研究了将回旋管及其他高功率微波器件的振荡输出模式转换成准光高斯波束的模式变换器, 采用伏拉索夫 (Vlasov) 辐射器和三级准光反射面实现了准高斯模 TEM_{00} 的横向输出. 研究了 Vlasov 辐射器的工作机理, 运用矢量绕射理论计算出波导辐射场, 口面电流分布的方法计算反射面辐射场. 通过编写程序设计了将 94 GHz, 模式为 TE_{62} 的毫米波转化为准光高斯波束的内置式准光模式变换器.

关键词: 94 GHz 回旋管, 内置式准光模式变换器, Vlasov 辐射器, 矢量绕射理论

PACS: 42.25.Fx

1. 引言

回旋管具有高增益、高效率、高峰值功率、高平均功率等优点, 适合作强功率雷达、电子高能射频加速器、电子回旋共振加热系统的功率源^[1]. 回旋管的输出模式一般为对称高阶体模 ($TE_{0p}, p \gg 1$) 或高阶边廊模 ($TE_{mp}, m \gg 1$ 且 $p = 1$ 或 $p = 2$), 此模式无确定的极化方向, 并且其轴向辐射呈不理想的空心圆锥状, 因此需要模式变换器将回旋管输出的微波能量转换为适当的传输模式, 实现高效率的微波传输以及辐射. 传统的模式变换器一般采用波导结构, 波导结构的模式

变换器主要针对低阶模式进行变换, 对回旋管输出的高阶模式进行变换就会结构复杂、效率低、带宽窄, 而采用准光模式变换器能实现高阶模式的高效紧凑转换. 目前, 国内仅电子科技大学和中国科学院电子学研究所对准光模式变换器进行研究^[2], 还处于初级阶段, 国外已经成功研制出 170 GHz 回旋管准光模式变换器^[3], 功率传输效率达到 90% 以上. 内置式准光模式转换器功率输出结构如图 1(a) 所示, 它直接从横向输出准光高斯波束 TEM_{00} 模. 与径向输出的回旋管相比 (如图 1(b) 所示), 横向输出结构还具有如下几个优点^[4]:

1) 波的反射被隔离. 由于高功率微波横向输

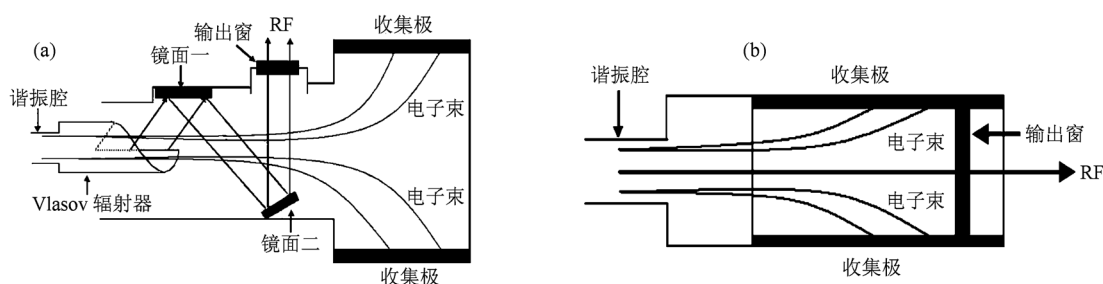


图 1 回旋管输出结构示意图 (a) 横向输出; (b) 径向输出

* 国家自然科学基金 (批准号: 10775029)、中国科学院光电所微细加工光学技术国家重点实验室基金 (批准号: ZDSYS09-1) 和四川省科技支撑计划基金 (批准号: 2010GZ0157) 资助的课题.

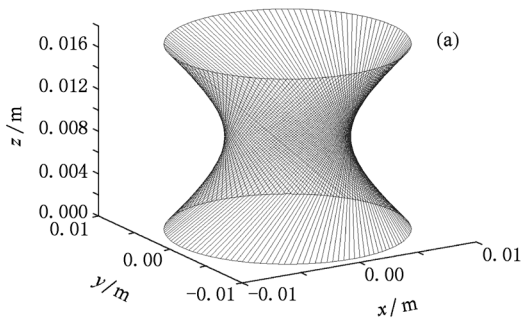
[†] 通讯联系人. E-mail: zhaq@uestc.edu.cn

出,在输出窗倾斜的情况下反射到谐振腔的电磁波将减少,避免了电磁波干扰谐振腔中波注互作用.

2)可方便地实现波与电子束的分离.电子束收集极不再成为输出波导的一部分,由于波的输出方向在横向,可以自由设计降压收集极形状,提高整管效率.

3)输出模式是最佳的线极化高斯波束,可以直接用波纹波导传输,也可以直接利用输出的高斯波束.

因此本文研究了将频率为 94 GHz,模式为 TE_{62} 的毫米波转化为准高斯模式的内置式准光模式变换器,首先采用几何光学理论对 Vlasov 辐射器的工作机理^[3]进行分析,然后运用矢量绕射理论对辐射场进行分析,最后建立物理模型,编制了相应的数值计算程序,进行仿真模拟,对设计结果进行讨论.



2. 理论分析与设计

2.1. Vlasov 辐射器分析

从几何光学的观点^[2],波导中的波沿着射线方向传播,而这些射线在波导内壁来回反射,形成半径为 r_c 的焦散面,并沿螺旋线方式向前传播,如图 2(a)所示,利用 Hankle 函数的德拜渐近形式可以导出圆波导中任意位置 (r, φ, z) 处波数矢量为^[4,5]

$$\mathbf{k}_0 = k_c \cos \gamma \mathbf{i}_r + (mr) \mathbf{i}_\varphi - \beta \mathbf{i}_z, \quad (1)$$

其中 k_c 为截止波数 x_{mn}/a , γ 为 \mathbf{k}_0 在横向的投影 k_c 与 \mathbf{i}_r 分量之间的夹角,即 $\gamma = \arcsin(m/k_c r)$,当这些射线沿波导传播时,以 $\alpha = \arccos(m/x_{mn})$ 的反射角被波导壁反射.同时其传播方向总是与焦散面相切(焦散半径为 $r_c = m/k_c$),如图 2(b)所示,并与 z 轴成布里渊(Brillouin)夹角 $\theta_B = \arccos(\beta/k_0)$.

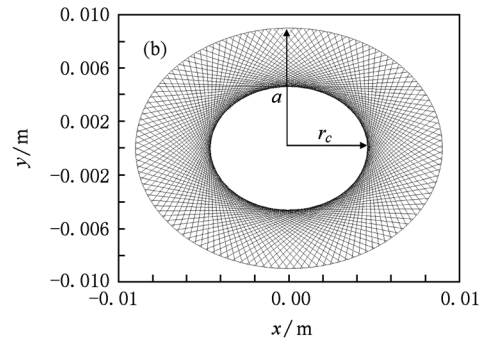


图2 圆波导旋转模式的几何光学射线表示 (a)三维示意图;(b)二维示意图

Vlasov 辐射器主要是由圆波导的一条纵向开口和一条螺旋型切开口构成,图3为展开示意图,其中展开时的倾角为

$$\tau = \arctan(\alpha \tan \theta_B / \sin \alpha). \quad (2)$$

要获得最佳的方向性,就要通过直切段将射向斜切段一侧的能量反射到另一侧,由于波导中的能流是螺旋方式行进的,因此 Vlasov 辐射器的螺旋形斜开口也要顺着能量方向开口.利用通过矩形口径面的能量和波导输入能量相等推导出 Vlasov 辐射器纵向开口长度的长度为^[5,6]

$$L_1 = 2\pi a^2 \beta / x_{mn} \sqrt{1 - (m/x_{mn})^2} [\arccos(m/x_{mn})]^{-1} \times (x_{mn}^2 - m^2/x_{mn}) \times \frac{J_m^2(x_{mn})}{1 - J_m^2(x_{mn}) + J_m^2(x_{mn}) - 2 \sum_{k=1}^m J_k^2(x_{mn})}. \quad (3)$$

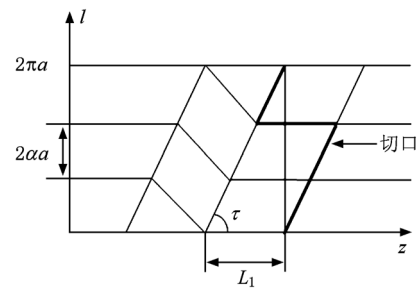


图3 Vlasov 辐射器展开示意图

2.2. 辐射场及反射面的分析计算

利用几何光学的方法可以从机理上对 Vlasov 辐射器进行近似分析,但无法得到明确的场分布,因此需要更为精确的分析方法.矢量绕射理论能满足计算精度和计算速度的要求.一般采用克希荷夫

(Kirchhoff) 积分公式, 由于 Kirchhoff 积分处理的积分面为封闭曲面, 不满足格林定理所要求的在积分面上的连续性条件, 因此必须引入新的假设, 即在积分口径面边缘上存在线电荷, 采用口径面积分方法^[7,8]

$$\begin{aligned} \mathbf{E}' &= \frac{1}{4\pi j\omega\epsilon} \iint_S [k^2(\mathbf{n} \times \mathbf{H})G \\ &\quad + (\mathbf{n} \times \mathbf{H}) \cdot \nabla(\nabla G) \\ &\quad + j\omega\epsilon(\mathbf{n} \times \mathbf{E} \times \nabla G)] dS, \\ \mathbf{H}' &= \frac{-1}{4\pi j\omega\mu} \iint_S [k^2(\mathbf{n} \times \mathbf{E})G \\ &\quad + (\mathbf{n} \times \mathbf{E}) \cdot \nabla(\nabla G) \\ &\quad - j\omega\mu(\mathbf{n} \times \mathbf{H} \times \nabla G)] dS, \end{aligned} \quad (4)$$

其中 \mathbf{E} 和 \mathbf{H} 表示矩形面上的电磁场, S 代表矩形面, \mathbf{n} 为矩形面的外法线方向, $G = \frac{e^{-jk_0 R}}{R}$ 是自由空间格林函数, R 为矩形面上的点到所求空间点的距离, \mathbf{E}, \mathbf{H}' 分别表示为矩形面上辐射的空间点处的电场强度和磁场强度. Vlasov 辐射器辐射出的波束必须经过一级或者多级反射面的相位校正才能最后变换成准高斯波束, 利用口面电流分布的方法可计算出反射面在空间的辐射场

$$\begin{aligned} \mathbf{E}_p &= \frac{1}{2\pi j\omega\epsilon} \iint_{S_1} [k^2(\mathbf{n}_1 \times \mathbf{H}_1)G \\ &\quad + (\mathbf{n}_1 \times \mathbf{H}_1) \cdot \nabla(\nabla G)] dS_1 \\ \mathbf{H}_p &= \frac{1}{2\pi} \iint_{S_1} (\mathbf{n}_1 \times \mathbf{H}_1) \times \nabla G dS_1, \end{aligned} \quad (5)$$

其中 $\mathbf{E}_1, \mathbf{H}_1$ 分别表示为反射面上的电场强度和磁场强度. S_1 表示反射面, \mathbf{n}_1 表示反射面外法线方向. \mathbf{E}_p 和 \mathbf{H}_p 分别表示反射面辐射的电场强度和磁场强度.

3. 94 GHz, TE₆₂ 模式内置式准光模式变换器设计

通过以上理论分析, 建立数值模型, 如图 4 所示为内置式准光模式变换器结构图, 由矩形口径 (等效为 Vlasov 辐射器) 和三级准光反射面组成. 在半径为 9 mm 的波导中输入 94 GHz, TE₆₂ 模式的毫米波, 由 (3) 式可以计算出 Vlasov 辐射器切口长度为 54.2×10^{-3} m. 第一个反射面采用抛物反射柱面, 在局部坐标系下其表达式为 $y_1^2 = -4f_1 x_1$, 运用几何光学理论可以得出焦距为 $f_1 = 23.9 \times 10^{-3}$ m, 中心坐

标为 $(23.9 \times 10^{-3}, -4.6 \times 10^{-3}, 27.1 \times 10^{-3})$, 在 y - z 面上口径尺寸为 $60 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$, 通过数值计算得到在第一个反射面上的等势图 5. 第二个反射面采用椭圆抛物柱面, 在局部坐标系下其表达式为 $x_2 = \frac{y_2^2}{a} + \frac{z_2^2}{b}$, 中心坐标为 $(-70 \times 10^{-3}, -4.6 \times 10^{-3}, 133.6 \times 10^{-3})$, 通过反复优化参数, 得到 $a = 752.24 \times 10^{-3} \text{ m}$, $b = 650.25 \times 10^{-3} \text{ m}$, 在 y - z 面上口径尺寸为 $120 \text{ mm} \times 120 \text{ mm}$, 逆时针旋转 22.5° 时第三个反射面处得到的功率传输效率达到最高, 计算得到第二面上的磁场能量等势图见图 6 所示. 第三个反射面采用平面镜, 使得在输出窗处高斯成分达到最高, 中心坐标为 $(70 \times 10^{-3}, -4.6 \times 10^{-3}, 245.2 \times 10^{-3})$, 顺时针旋转 17.1° , 在 y - z 面上口径尺寸为 $70 \text{ mm} \times 60 \text{ mm}$, 等势图见图 7. 图 8 为磁场能量在输出窗处二维等势图, 中心坐标为 $(-135 \times 10^{-3}, -4.6 \times 10^{-3}, 245.2 \times 10^{-3})$, 在 y - z 面上口径尺寸为 $70 \text{ mm} \times 80 \text{ mm}$, 图 9 为磁场能量在输出窗处三维等势图. 从各级镜面到输出窗磁场能量等势图可以看出空间辐射场在向准高斯波束场过渡, 最后在输出窗口处达到准高斯波束的横向输出.

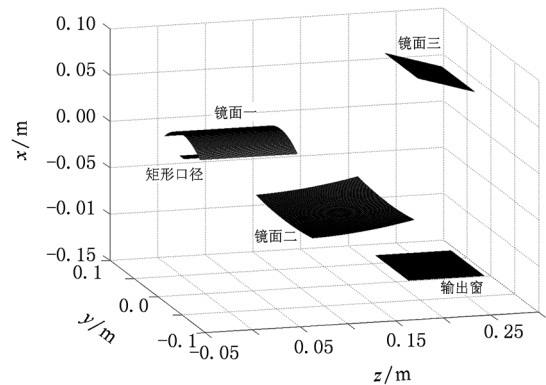


图4 准光模式变换器结构图

表1 各级镜面功率传输效率

镜面	传输效率/%
矩形口径	100
第一镜面	91.2
第二镜面	88.3
第三镜面	86.2
输出窗	85.6

每一级镜面的传输功率大小可以由下式得出:

$$P = \frac{1}{2} \iint \text{Re}[\mathbf{E} \times \mathbf{H}^*] \cdot d\mathbf{s}. \quad (6)$$

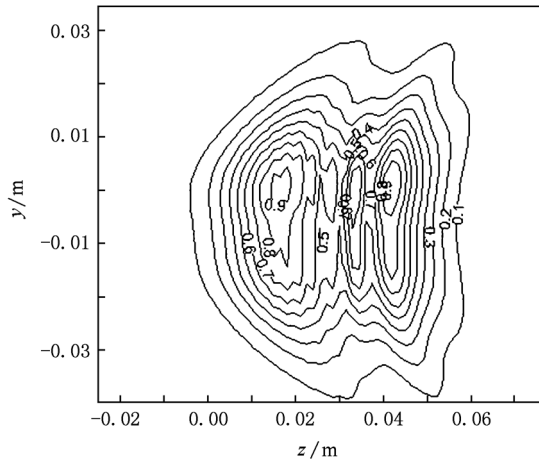


图5 第一反射面磁场能量的等势图

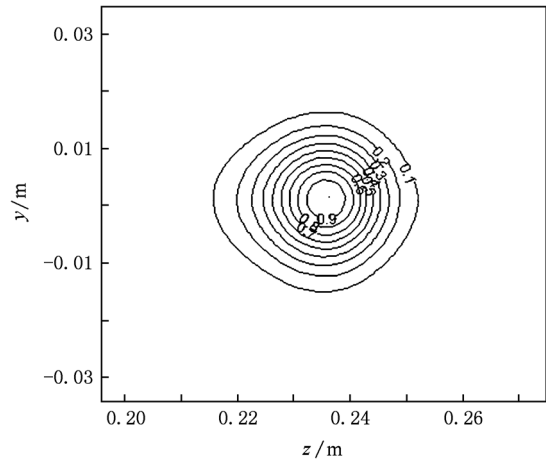


图8 输出窗口处磁场能量的等势图

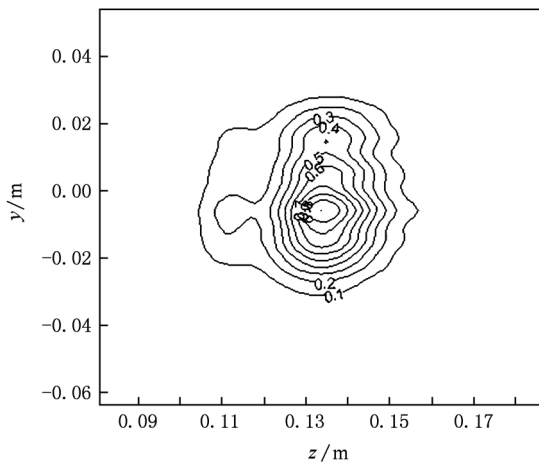


图6 第二反射面磁场能量等势图

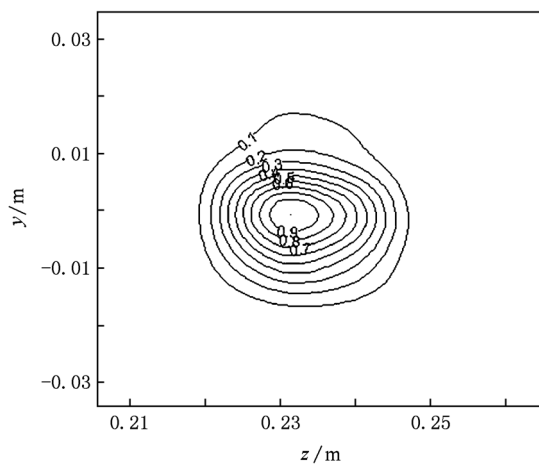


图7 第三反射面磁场能量的等势图

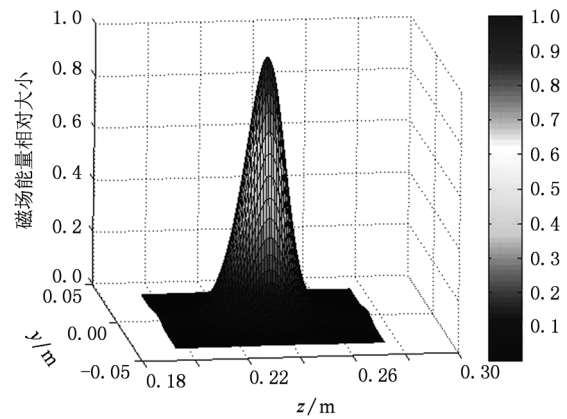


图9 输出窗处磁场能量等势图(三维)

1 可知,微波传输到第一级反射镜面时传输效率只有 91.2%,这是由于 Vlasov 辐射器辐射主瓣较宽,因此有限大的第一反射镜面未能截获到更多的能量.通过计算矩形口径和输出窗上的能量之比可以得出整个系统的功率传输效率达到 85.6%,在输出窗口处得到的准高斯模式束腰为 $18 \text{ mm} \times 18 \text{ mm}$.

4. 结 论

本文设计了将 94 GHz, 模式为 TE_{62} 的毫米波转化为准光高斯波束的内置式准光模式变换器.通过设计和优化 Vlasov 辐射器以及三个准光反射面实现了准高斯模 TEM_{00} 的横向输出.完成模式在波导中的传播研究,分析了伏拉索夫辐射器的工作机理,运用矢量绕射理论计算了反射面的辐射场.通过数值仿真,反复优化三个准光反射面,在输出窗

计算出各级镜面的功率传输效率见表 1 所示.由表

口处得到了束腰宽度为 $18\text{ mm} \times 18\text{ mm}$ 的准高斯波束, 整个准光模式变换器系统传输效率达到

85.6%, 下一步工作即设计相位反射面进一步提高高斯波束的含量.

-
- [1] 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]
 - [2] Yang S W 1997 *Ph. D. Dissertation* (Chengdu: University of Electronic Science and Technology) (in Chinese) [杨仕文 1997 博士学位论文(成都: 电子科技大学)]
 - [3] Jin J B 2005 *Ph. D. Dissertation* (Chengdu: Southwest jiaotong university) (in Chinese) [金践波 2005 博士学位论文(成都: 西南交通大学)]
 - [4] Thumm M, Kasperek W 2002 *IEEE Trans Plasma Sci.* **30** 755
 - [5] Liu J W, Zhao Q, Sun X, Li H F 2008 *High Power Laser and Particle Beams* **20** 1689 (in Chinese) [刘建卫、赵青、孙旭、李宏福 2008 强激光与粒子束 **20** 1689]
 - [6] A W Möbius, J A Casey, K E Kreischer, A Li, R J Temkin 1992 *Int. J. Infrared Millim. Waves* **13** 1033
 - [7] Huang H J 1965 *Microwave Theory* (Vol. 2) (Beijing: Science Press) p504 (in Chinese) [黄宏嘉 1965 微波原理(下卷)(北京: 科学出版社)第 504 页]
 - [8] Black M, Kreischer K, Temkin R J 1996 *IEEE Trans Plasma Sci.* **24** 1058

Design of a quasi-optical mode converter for 94 GHz gyrotron^{*}

Liu Jian-Wei Zhao Qing[†] Li Hong-Fu

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

(Received 24 December 2010; revised manuscript received 6 January 2011)

Abstract

Based on geometry optics theory and vector diffraction theory, mode converter is studied to convert the gyrotron and other high-power microwave oscillator output mode into quasi-optical Gaussian beam, using Vlasov launcher and two quasi-optical reflector achieved quasi-Gaussian mode TEM_{00} transverse output. The working mechanism of Vlasov launcher in analyzed, the radiation field is calculated by using vector diffraction theory, and the surface radiation field is also calculated by using the surface current distribution method. A built-in quasi-optical mode converter is designed to convert the 94GHz, TE62 model millimeter wave into quasi-optical Gaussian beam through programming.

Keywords: 94 GHz gyrotron, quasi-optical mode converter, vlasov launcher, vector diffraction theory

PACS: 42.52.Fx

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 10775029), the State Key Laboratory of Optical Technologies for Microfabrication, Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, China (Grant No. ZDSYS09-1), and the Key Technology Research and Development Program of Sichuan Province, China (Grant No. 2010GZ0157).

[†] Corresponding author. E-mail: zhaoq@uestc.edu.cn