

文章编号:1001-9014(2011)05-0429-05

## 94 GHz $TE_{6,2}$ 模内置准光模式变换器

牛新建<sup>1</sup>, 顾 铃<sup>2</sup>, 于新华<sup>1</sup>, 李宏福<sup>1</sup>

(1. 电子科技大学 物理电子学院, 四川 成都 610054;

2. 西南民族大学 计算机科学与技术学院, 四川 成都 610041)

**摘要:**提出了可应用于94 GHz回旋管内部的 $TE_{6,2}$ 准光模式变换器.根据几何光学和矢量绕射理论编制了模拟其电磁行为的分析和优化程序.根据几何光学原理,设计了该模式变换器的初步结构参数,然后利用该优化程序获得了最优化的相关参数.优化结果表明,在94 GHz,该准光变换器功率转换效率约为85%,转换所得波束高斯含量高于70%.

**关键词:**回旋管; $TE_{6,2}$ 模;94 GHz;准光模式变换器

**中图分类号:**TN811;TN814 **文献标识码:**A

## A $TE_{6,2}$ 94 GHz inner quasi-optical mode converter

NIU Xin-Jian<sup>1</sup>, GU Ling<sup>2</sup>, YU Xin-Hua<sup>1</sup>, LI Hong-Fu<sup>1</sup>

(1. College of Physical Electronics, University of Electronics Science and Technology of China, Chengdu 610054, China;

2. College of Computer Science and Technology, Southwest University for Nationalities, Chengdu 610041, China)

**Abstract:** A quasi-optical mode converter transforming  $TE_{6,2}$  mode to Gaussian-like mode is proposed to be employed in 94 GHz Gyrotron. A simulation code is written to model electromagnetic behaviour related to the converter based on the geometric optics and vector diffraction theory. Initial geometry parameters of the converter obtained according to the geometric optics are optimized to make the converter high efficient. Optimization gives a Gaussian mode content of more than 70% and an approximate transmission efficiency 85% for  $TE_{6,2}$  mode at 94 GHz.

**Key words:** Gyrotron,  $TE_{6,2}$  mode, 94 GHz; quasi-optical mode converter

**PACS:** 84.40.1k, 52.50.-b

### 引言

回旋管作为目前高功率毫米波源的首选器件,在材料处理、电子回旋加热和高分辨率雷达等方面有着很好的应用和发展前景<sup>[1-2]</sup>.研制高功率、高效率的回旋管毫米波源是国际上的一个研究热点.可是,回旋管腔体输出的工作模式一般不适合直接利用,通常需要模式变换将这些模式转换为便于利用的形式.对于低阶模式,一般采用波导模式变换器,此时,波导模式变换器易于设计且具有理想的转换效率;但应用于高阶模式时,波导模式变换器不仅变得复杂、很难设计而且尺寸很大极不利于系统紧凑性的提高;此时,可以采用准光模式变换器.

准光模式变换器,最初由前苏联科学家付拉索夫提出,因而又称为付拉索夫变换器.此后,俄罗斯

的科学家丹尼索夫将付拉索夫变换器的辐射波导变为波纹波导,可以使得付拉索夫变换器具有更高的转换效率,这种改进型付拉索夫模式变换器被称为丹尼索夫模式变换器.准光模式变换器由于属于开敞波导结构,相对于传统的波导模式变换器,可以拥有大的功率容量,而且具有紧凑的结构,可以放入回旋管输出波导内构成回旋管的一个部件,大大提高回旋管工作的稳定性和管子的工作性能;回旋管内置准光模式变换器可以将电子束通道与输出微波的通道分开和自由设计降压收集级等特点,使得其在国际上获得了重视,成为研究的一个热点.目前,国际上商用回旋管很多都采用准光模式变换器实现腔体模式向所需要模式的转换<sup>[3-4]</sup>,国内关于准光模式变换器的研究报道很少,仅散见于少数文献<sup>[5]</sup>,且很少见到比较系统的研究报道.

收稿日期:2010-06-18,修回日期:2011-04-18

基金项目:国家863激光技术领域资助课题(863-410-7)

作者简介:牛新建(1969-),男,博士,副教授,主要从事回旋器器件及高功率微波技术研究,E-mail:niuxinjian@sohu.com.

Received date: 2010-06-18, revised date: 2011-04-18

本文提出了一种  $TE_{\phi,2}$  准光模式变换器,用数值分析的方法研究了该模式变换器的电磁性能,给出了该变换器主要的优化结构参数,所取得的相关结果和研究方法对于准光模式变换器的研制具有重要的理论指导意义。

## 1 付拉索夫模式变换器模型

从几何光学观点看<sup>[6]</sup>,付拉索夫模式变换器利用其非对称结构,将圆波导模式辐射为有一定方向性的空间辐射场—其波前可用光线来描述,光线方向为电磁波能流方向—这些光线再经一系列金属镜面进行反射整形,最后形成便于利用的准高斯波束。如果待变换模式为圆对称模式,其辐射器切口一般为斜劈型,如果待变换的模式为圆非对称模式,辐射器切口一般为螺旋形,螺旋方向与电磁模式的旋转方向一致,以将非对称模式解旋为线极化波束。

对于工作模式为旋转模式的回旋振荡管来讲,其稳定工作时要么工作于左旋模式要么工作于右旋模式,绝对不可能同时工作左旋和右旋模式,为分析方便,这里假定所要转化的模式为一右旋模式。圆波导中沿 +z 方向传播的右旋  $TE_{mn}$  模式的电磁场各个分量可以写为

$$E_r = -\frac{m\omega\mu}{r}A_{mn}J_m\left(\frac{\mu_{mn}}{r}\right)e^{-j(\beta z+m\phi)}, \quad (1)$$

$$E_\phi = j\omega\mu\frac{\mu_{mn}}{a}A_{mn}J'_m\left(\frac{\mu_{mn}}{r}\right)e^{-j(\beta z+m\phi)}, \quad (2)$$

$$H_r = -j\beta\omega\frac{\mu_{mn}}{a}A_{mn}J'_m\left(\frac{\mu_{mn}}{r}\right)e^{-j(\beta z+m\phi)}, \quad (3)$$

$$H_\phi = -\frac{m\beta}{r}A_{mn}J_m\left(\frac{\mu_{mn}}{r}\right)e^{-j(\beta z+m\phi)}, \quad (4)$$

$$H_z = (k_0^2 - \beta^2)A_{mn}J_m\left(\frac{\mu_{mn}}{r}\right)e^{-j(\beta z+m\phi)}, \quad (5)$$

其中  $k_0 = \omega\sqrt{\varepsilon_0\mu_0}$  为电磁波在真空中的波数, $\beta$  为电磁波在波导中沿 z 向传播的相位常数, $\mu_{mn}$  为贝塞尔函数导数的第 n 个非零根, $a$  为波导半径。

从几何光学理论来看,波导中的波沿着射线方向传播,并在波导内壁来回反射,形成一半径为<sup>[7]</sup>

$$r_c = a\frac{m}{\mu_{mn}}, \quad (6)$$

的焦散面 caustic (在圆波导内该焦散面为一圆柱面),并沿螺旋线方式向前传播,如图 1 所示。

将 Hankle 函数进行德拜渐近形式展开后可导出圆波导中任意位置处  $(r, \phi, z)$  电磁波数矢量(即光线传播方向)为

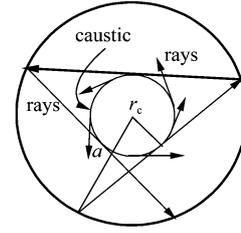


图 1 圆波导内焦散面的形成示意

Fig. 1 Geometric optical description of caustic plane

$$\vec{k}_0 = k_c \cos\gamma \vec{i}_r + \frac{m}{r} \vec{i}_\phi - \beta \vec{i}_z, \quad (7)$$

其中  $k_c$  为电磁波在圆波导中的截止波数其值为  $\frac{\mu_{mn}}{a}$ ,

$\gamma$  为  $\vec{k}_0$  在横向的投影( $\vec{k}_c$ ) 与其  $\vec{i}_r$  分量之间的夹角

$$\gamma = \sin^{-1}(m/k_c r). \quad (8)$$

当这些射线沿波导行进时,其行进方向总是与焦散面相切,并与 z 轴成布里渊角(也称为弹射角度)

$$\theta_B = \sin^{-1}\left(\frac{\mu_{mn}}{k_0 a}\right). \quad (9)$$

由于辐射器波导中右旋模式的能流沿右手螺旋方式行进,所以 Vlasov 辐射器的螺旋形斜开口采用右手螺旋切口,以便使得模式能量有效向外空间辐射。图 2 给出了辐射器波导及其螺旋形切口及坐标系示意,其中用 Gray area 指示的区域为一矩形辅助分析区,为方便起见称其为矩形口径面,其窄边宽度为辐射器波导半径,宽边宽度为螺旋切口的螺距,且一宽边位于波导轴线上,另一宽边与波导壁上的直切口重合。坐标系  $x-y-z$  的原点 o 位于轴线上的宽边中点,z 轴与波导轴线重合,y 轴与宽边平行,x 轴垂直于矩形口径面指向能量辐射的方向。由于波导中能流的方向与螺旋形斜切口的方向相同,所以可以假定辐射器开口处的场即为辐射器波导中的未扰动场,能流沿螺旋方向行进且全部通过图 2 所示的矩形口径面。基于以上假设,辐射器向周围空间辐射的电磁场,就可以认为是矩形口径面上的场所做的贡献,即辐射器在空间任意一点处产生的场,可等效为此矩形口径面上的场(源)的作用。显然在这样的假设下,矩形口径面上的场分布的直角坐标系形式可以写为:

$$E_x = E_\phi \Big|_{\phi = -\frac{\pi}{2}}, \quad (10)$$

$$E_y = E_r \Big|_{\phi = -\frac{\pi}{2}}, \quad (11)$$

$$H_x = H_\phi \Big|_{\phi = -\frac{\pi}{2}}, \quad (12)$$

$$H_y = H_r \Big|_{\phi = -\frac{\pi}{2}}, \quad (13)$$

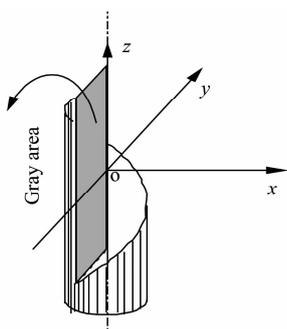


图2 付拉索夫辐射器右螺旋形斜切口  
Fig.2 Launcher of Vlasov-type with a helical cut

$$H_z = H_z |_{\phi = -\frac{\pi}{2}}, \quad (14)$$

这种简化可避免直接求解螺旋切口面上场对空间任意一点所产生场的困难.

辐射器螺旋切口的长度(即能流沿螺旋轨迹行进时的螺距)为

$$L = 2\pi a^2 \left( \frac{\beta_z}{\mu_{mn}} \right) \sqrt{\frac{1 - \left( \frac{m}{\mu_{mn}} \right)^2}{\cos^{-1} \left( \frac{m}{\mu_{mn}} \right)}}. \quad (15)$$

焦散圆与辅助矩形的轴向交线,为了方便叙述,我们称为焦散圆的焦散线.该焦散线可看作直线辐射源,它发出的光线均与轴向呈相同的弹射角度  $\theta_B$  向外辐射,当一抛物柱面的焦线与此焦散线重合时,从焦散线所发出的光线经抛物柱面反射后将变为彼此平行的光线射出,然后若经椭圆抛物柱面聚焦成高斯光束投射到窗面上,完成馈源模式向高斯模式的转换.需要说明的是为了简化计算我们忽略了反射镜对辐射口径的影响.

根据以上设想给出图3所示的一种 TE<sub>6,2</sub> 模付拉索夫模式变换器,它由螺旋形切口辐射器(radiator)、抛物柱面镜(mirror 1)和椭圆抛物面镜(mirror 2)构成,设计合适的结构参数,使得变换所得的准高斯波束束腰落在输出窗面内,束斑中心位于窗面中心.此外,这样转换所得的光束不是理想的高斯波束,其中依然含有非对称模的成分,也就是说最后的输出波束有一个高斯成分含量的问题.也正因为所得到的波束不是纯粹的高斯波束,所以通常也把准光变换器输出的波束称为准高斯波束.需要说明的是,图中所给出的坐标为全局坐标系  $x-y-z$  下的坐标.

为便于观察各个镜面以及窗口面上场的分布,将这些面所在全局坐标系转换为局部坐标系.在局部坐标系  $x_1-y_1-z_1$  中抛物柱面的横截母线解析式满足

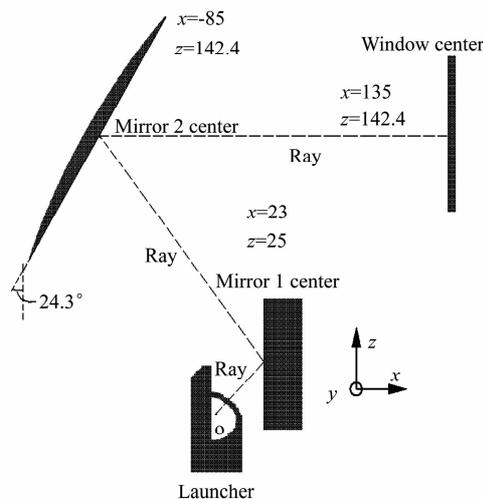


图3 付拉索夫模式变换器结构图  
Fig.3 Geometric of Vlasov launcher

$$y_1^2 = -4f_p x_1, \quad (16)$$

其中  $f_p$  为抛物线的焦距.

在局部坐标系  $x_2-y_2-z_2$  中,椭圆抛物镜面的解析式满足

$$x_2 = \frac{y_2^2}{a_e} + \frac{z_2^2}{b_e}, \quad (17)$$

其中  $a_e, b_e$  为参数.

在局部坐标系  $x_3-y_3-z_3$  中,窗面(计算时采用正方形面)位于  $x_3-o_3-y_3$  平面内,其各边平行于局部坐标轴,其中心位于局部坐标原点  $o_3$ .

为了明确起见,将局部坐标与全局坐标的关系列出如下

局部坐标系 1 和全局坐标系的关系

$$x_1 = x - f_p, \quad (18)$$

$$y_1 = y + r_c, \quad (19)$$

$$z_1 = z - \frac{f_p}{\tan\theta_B}. \quad (20)$$

局部坐标系 2 和全局坐标系的关系

$$x_2 = x \cos\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\theta_B}{2}\right) - z \sin\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\theta_B}{2}\right) + \frac{f_p \cos\left(\frac{\pi}{4} - \frac{3\theta_B}{2}\right)}{\sin\theta_B} + \sqrt{\frac{1 + \sin\theta_B}{2}} L_1, \quad (21)$$

$$y_2 = y + r_c, \quad (22)$$

$$z_2 = z \cos\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\theta_B}{2}\right) + x \sin\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\theta_B}{2}\right) - \frac{f_p \cos\left(\frac{\pi}{4} - \frac{3\theta_B}{2}\right)}{\sqrt{2}\sin\theta_B} - L_1 \sqrt{\frac{1 - \sin\theta_B}{2}}. \quad (23)$$

局部坐标系 3 和全局坐标系的关系

$$x_3 = -z + \frac{f_p}{\tan\theta_B} + L_1 \cos\theta_B, \quad (24)$$

$$y_3 = y + r_c, \quad (25)$$

$$z_3 = x - f_p + L_1 \sin\theta_B - L_2, \quad (26)$$

其中,  $L_1$  为局部坐标系 1 与 2 原点间的距离,  $L_2$  为局部坐标系 2 与 3 原点间的距离.

## 2 准光模式变换器的数值分析方法

Vlasov 模式变换器一般要作为回旋管的一个内置部件,其尺寸相对于工作波长不能很大,在分析和计算辐射场的时候,由于电磁场在跨越积分口径面边缘时是不连续性的,因此必须假设在积分口径面边缘上存在着线电荷,即必须采用矢量绕射口面积分理论进行场的分析和计算,不适合采用标量绕射理论进行计算.基于矢量绕射理论的 Stratton-Chu 公式求解由口面上的电磁场矢量在观察点处产生的积分效应为

$$\begin{aligned} \mathbf{E}(x, y, z) = & -\frac{j}{\omega\epsilon} \iint_{s'} [k_0^2 \mathbf{J}_e + (\mathbf{J}_e \cdot \nabla) \nabla \\ & - i\omega\epsilon \mathbf{J}_m \times \nabla] \psi ds', \quad (27) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mathbf{H}(x, y, z) = & \frac{-j}{\omega\mu} \iint_{s'} [k_0^2 \mathbf{J}_m + (\mathbf{J}_m \cdot \nabla) \nabla \\ & + i\omega\mu \mathbf{J}_e \times \nabla] \psi ds', \quad (28) \end{aligned}$$

$$R = \sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2 + (z-z')^2}, \quad (29)$$

其中  $\mathbf{J}_e = \mathbf{n} \times \mathbf{H}'$ ,  $\mathbf{J}_m = \mathbf{n} \times \mathbf{E}'$ , 这里的  $\mathbf{E}'$ 、 $\mathbf{H}'$  都是源场,  $\mathbf{J}_e$ 、 $\mathbf{J}_m$  分别为源分布区域  $s'$  内的电流和磁流,  $\mathbf{n}$  为由口径面指向辐射方向的单位矢量.  $\psi = \frac{e^{-jk_0R}}{4\pi R}$  为球面波函数,  $R$  为源点到所求空间场点的距离,  $j$  为虚数单位.  $\mathbf{E}(x, y, z)$ 、 $\mathbf{H}(x, y, z)$  分别为源在空间任意一点  $(x, y, z)$  处激励起的电场和磁场强度.  $\nabla$  算子仅作用于带撇的量,就是说仅作用于源点坐标.

利用上述计算过程可得到空间任意点处的电磁场值.各个面上的场计算方法具体如下:先计算辐射器在抛物柱面上产生的场,然后计算抛物柱面上的场在椭圆抛物面上产生的场,最后计算椭圆抛物面上的场在窗面处产生的场.窗面上场所含高斯成分可用相关系数来表征

$$\eta_v = \frac{\int_s \mathbf{g} \cdot \mathbf{u} ds \cdot \int_s \mathbf{g}^* \cdot \mathbf{u}^* ds}{\int_s |\mathbf{g}|^2 ds \int_s |\mathbf{u}|^2 ds}, \quad (30)$$

其中,  $\mathbf{g}$ ,  $\mathbf{u}$  为复数,分别表示理想高斯波束和计算所

得的准高斯波束的场分布(含幅度和相位).

## 3 数值计算及结果分析

据以上理论模型,选取 94 GHz TE<sub>6,2</sub> 模式为付拉索夫模式变换器的馈源,其辐射器波导直径取为 9 mm.

采用几何光学原理初步设计出准光变化系统的结构及其空间参数,根据上述算法编制准光模式变换器结构参数优化程序,进行优化计算最终可获得实现最佳模式变换(变换效率和功率传输效率均达最大值)时的准光模式变换器参数.需要说明的是,由于在优化过程中需要反复进行复矢量的二维面积分,而复矢量积分中所含的形如  $e^{-jk_0R}$ 、 $e^{-\beta z}$  项在频率较高、积分口径面尺寸较大时属于收敛很慢的振荡项,所以必须选用速度快、精度较高的 Gauss-Legend 积分法.

优化所得的各个镜面以及窗口中心空间位置参数(见图 3)和镜面的几何参数(见表 1).

表 1 镜面几何参数

Table 1 Geometric parameter of mirrors

抛物柱面		椭圆抛物面		
$f_p/\text{mm}$	$L_p$	$a/\text{mm}$	$b/\text{mm}$	$h/\text{mm}$
23	110	936	1038	3

表 1 中,  $L_p$ 、 $h$  分别为抛物柱面纵向长度和椭圆抛物面底面中心与其顶点间的距离.

此时,各个镜面以及窗口平面上电磁波场二维分布如图 4~6 所示.从这些图可以直观地看到,辐射器辐射到抛物柱面的波束经过椭圆抛物柱面聚焦后在窗口平面处形成了一准高斯束斑.

此外,由计算可得该模式变换器的功率转换效率约为 85%,所得准高斯波束束斑直径为 40 mm,其高斯含量超过 70%.

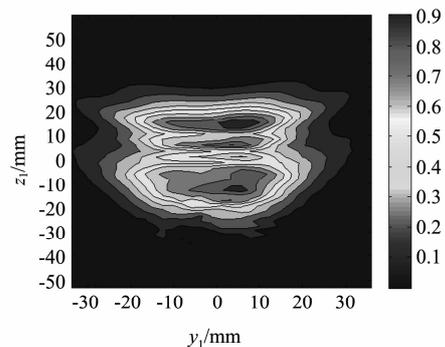


图 4 抛物镜面上的二维场分布

Fig. 4 Power distribution on the paraboloid mirrors

(下转 445 页)

模拟研究. 红外与毫米波学报), 2005, **24**(6):414-418.

- [5] SHI Guang-Yu. *Atmospheric radiology* [M]. Beijing: Science Press; 2007. (石广玉. 大气辐射学. 北京: 科学出版社, 2007.)
- [6] TAN He-Ping. *Numerical Calculation of Infrared Radiation Properties and Transfer* [M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press; 2006. (谈和平. 红外辐射特性与传输的数值计算—计算热辐射学 [M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2006.)
- [7] KOURGANOFF V. *Basic methods in transfer problems* [M]. New York: Dover Publications, 1963, 36-97.
- [8] MODEST M F, Yang Jun. Elliptic PDE formulation and boundary conditions of the spherical harmonics method of arbitrary order for general three-dimensional geometries [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2008, **109**(9):1641-1666.

- [9] YU Qi-Zheng. *Principles of Radiative Heat Transfer* [M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press; 2000. (余其铮. 辐射换热原理. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2000.)
- [10] BUSBRUDGE I W, Orchard S E. Reflection and transmission of light by a thick atmosphere according to a phase function:  $1 + x \cos \theta$  [J]. *The astrophysical Journal*, 1967, **149**:655-664.
- [11] MARUYAMA S. Radiative heat transfer in anisotropic scattering media with specular boundary subjected to collimated irradiation [J]. *Int. J. of Heat and Mass Transfer*, 1998, **41**:2847-2856.
- [12] ORCHARD S E. Reflection and transmission of light by a thick atmosphere of puer scattering with a phase function:  $1 + \omega_1 p_1(\cos \theta) + \omega_2 p_2(\cos \theta)$  [J]. *The astrophysical Journal*, 1967, **149**:665-674.

(上接 432 页)

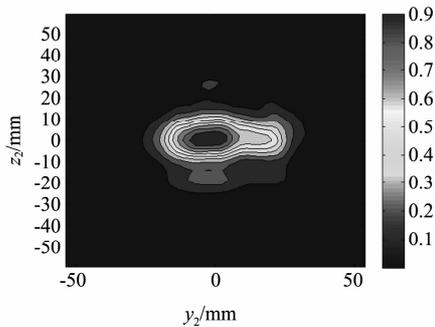


图 5 椭圆抛物镜面上的二维场分布  
Fig. 5 Power distribution on the elliptical mirrors

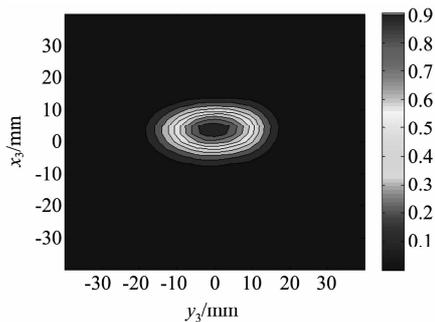


图 6 窗面上的二维场分布  
Fig. 6 Power distribution on the window plane

## 4 结论

采用几何光学和矢量绕射口面积分理论, 编制了分析和优化  $TE_{6,2}$  模式准光变换器的数值计算程序, 该程序采用了 Gauss-Legend 快速积分法非常有

利于进行优化计算. 计算表明, 准光模式变换器可将  $TE_{6,2}$  模式转化为较好的高斯波束, 波束直径为 40 mm, 功率转换效率约为 85%, 波束高斯成分含量超过 70%. 此结论对于研制内至于回旋管内部的高效、紧凑准光模式变换器具有重要的参考价值.

## REFERENCES

- [1] Petelin M I. One Century of Cyclotron Radiation [J]. *IEEE Trans on Plasma Science*, 1999, **27**(2):291-302.
- [2] Kartikeyan M V, Edith Borie, Oliver Drumm, et al. Design of a 42 GHz 200 kW Gyrotron Operating at the Second Harmonic [J]. *IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques*, 2004, **52**(2):686-692.
- [3] Yang Xiaokang, Thumm Manfred, Arnold K Andreas, et al. Progress toward optimization of phase-correcting mirrors for a multifrequency 1 MW Gyrotron [J]. *IEEE Trans on Plasma Science*, 2006, **34**(3):652-658.
- [4] Jin J B, Piosczyk B, Thumm M, et al. Quasi-optical mode converter/mirror system for a high power coaxial-cavity Gyrotron [J]. *IEEE Trans on Plasma Science*, 2006, **34**(4):1508-1515.
- [5] NIU Xin-jian, YU Sheng, LI Hong-fu, et al. Phase rematch on high-power millimeter wave mode converter [J]. *J. Infrared Millim. Wave* (牛新建, 喻胜, 李宏福, 等. 过模弯曲圆波导模式耦合设计. 红外与毫米波学报), 2006, **25**(1):51-54.
- [6] Lawson W. The design of a high-power, high-gain, frequency-doubling gyrokystron [J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2005, **33**(2):858-865.
- [7] NIU Xin-jian, GU Ling, YU Sheng, et al. corrugated waveguide mode conversion for 94ghz second-harmonic gyrotron [J]. *J. Infrared Millim. Wave* (牛新建, 顾玲, 喻胜, 等. 过模弯曲圆波导模式耦合设计. 红外与毫米波学报), 2007, **26**(2):117-120.