

文章编号: 1001 - 9014 (2010) 02 - 0109 - 05

# W 波段边廊模回旋管 Vlasov 模式 变换器的辐射场研究

王 斌<sup>1,2</sup>, 刘濮鲲<sup>1</sup>, 耿志辉<sup>1</sup>

(1. 中国科学院电子学研究所 中国科学院高功率微波源与技术重点实验室, 北京 100190;  
2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

**摘要:** 采用几何光学模型详细研究了边廊模回旋管中 Vlasov 模式变换器的工作原理, 利用等效像源模型结合矢量绕射理论分析了通过此模式变换器的辐射场. 考虑 W 波段边廊模回旋管的具体参数, 通过数值计算, 讨论了通过 Vlasov 模式变换器后辐射波束的场分布特性. 结果表明, Vlasov 模式变换器将回旋管中的高阶边廊模式转换为自由空间的高斯模式, 且远场的高斯场型较近场更好.

**关键词:** 回旋管; W 波段; 边廊模; Vlasov 模式变换器  
**中图分类号:** TN129 **文献标识码:** A

## INVESTIGATION ON RADIATION FROM A VLASOV MODE CONVERTER FOR W-BAND WHISPERING-GALLERY MODE GYROTRON

WANG Bin<sup>1,2</sup>, LU Pu-Kun<sup>1</sup>, GENG Zhi-Hui<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of High Power Microwave Sources and Technologies, Institute of Electronics,  
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;  
2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

**Abstract:** The principle of Vlasov mode converter for whispering-gallery mode gyrotron was studied in detail by using a geometric optics model. The radiation field passing through the mode converter was analyzed by using the equivalent image source model and the vector diffraction theory. After considering some particular parameters of W-band whispering-gallery mode gyrotron, the field distribution of radiated beam passing through Vlasov mode converter was discussed by numerical calculation. The results indicate that the high-order whispering-gallery mode inside the gyrotron is converted into Gaussian beams in free space by Vlasov mode converter, and the Gaussian distribution in the far zone is superior to that in the near zone.

**Key words:** gyrotron; W-band; whispering-gallery mode; Vlasov mode converter

### 引言

近几十年来,在等离子体物理学和相对论电子学基础上发展起来的一类高功率微波源器件——回旋管,由于能够填补传统微波管器件和激光器在毫米波、亚毫米波波段的缺口,因此在受控热核聚变等离子体加热、等离子体化学、高能粒子加速器、毫米波定向能武器与材料处理等领域得到广泛应用<sup>[1-4]</sup>.

回旋管利用回旋电子注与谐振腔内的微波模式

相互耦合产生电磁辐射.随着回旋管向着高功率、高频率发展,其工作模式大多采用低损耗的高阶腔体模式,最典型的工作模式有角对称  $TE_{0n}$  模,  $TE_{mn}$  边廊模 (Whispering Gallery Mode) 以及  $TE_{mn}$  不对称体模 (Asymmetric Volume Mode)<sup>[2]</sup>.边廊模是一种圆柱波导内能量传输邻近波导内壁表面的波导模式<sup>[5,6]</sup>.工作在过模结构的高阶腔体模式由于在传输过程中存在严重的绕射和极化损耗,实际上并不适合于自由空间的传输,必须将其转换为有利于传

收稿日期: 2009 - 03 - 02, 修回日期: 2009 - 10 - 13

Received date: 2009 - 03 - 02, revised date: 2009 - 10 - 13

基金项目: 国家自然科学基金 (60571039, 60971072)

作者简介: 王 斌 (1982-), 男, 重庆人, 博士研究生, 主要从事高功率微波源毫米波技术的研究.

传输的低阶波导模式或自由空间的高斯波束. 采用传统的波导模式变换器<sup>[7]</sup>对高阶模式进行降阶变换时, 变换器的尺寸巨大, 加工困难, 且模式竞争和损耗严重, 实际上是不可行的. 因此, 一般采用准光模式变换器来实现高阶模式的高效转换. 俄罗斯科学家 V lasov 等人首先提出的准光天线<sup>[8]</sup>, 后来发展成为 V lasov 模式变换器, 其结构简单、紧凑而且有效, 因此很快在高功率微波领域得到广泛关注<sup>[5, 6, 9~12]</sup>. 目前 V lasov 模式变换器在实际应用中已有多种变形<sup>[9, 10]</sup>. 我国在高频率高功率回旋管的研制方面与国际先进水平差距较大, 对回旋管横向准光输出的研究无论是在理论还是在制管方面都还处于探索阶段, 因此, 分析准光模式变换对指导实际制管具有很实际的实用价值.

本文首先采用几何光学模型研究边廊模回旋管 V lasov 模式变换器的工作原理, 再利用等效像源模型结合矢量绕射理论分析其辐射场, 最后结合 W 波段边廊模回旋管的具体参数, 讨论通过 V lasov 模式变换器后辐射波束的场分布特点.

### 1 边廊模回旋管 V lasov 模式变换器的工作原理

研究的 V lasov 模式变换器由 V lasov 天线 (波导开口辐射器) 和抛物面反射器组成, 其中 V lasov 天线采用螺旋状切割型. 由于工作在高阶腔体模式下的回旋管其腔体尺寸和螺旋切割长度都远远大于波长, 因此采用几何光学模型研究此模式变换器的机理能够保证精度要求<sup>[13]</sup>.

#### 1.1 V lasov 天线辐射 (圆柱波导开口辐射器的辐射)

对于工作在  $TE_{mn}$  边廊模下的圆波导回旋管, 考虑右旋电磁波, 其纵向磁场  $H_z$  在圆柱坐标系  $(r, \phi, z)$  下可以表示为

$$H_z = A_0 J_m(k_r r) e^{-jn\phi} e^{-k_z z} \quad (1)$$

其中,  $k_r = \frac{mn}{a}$ ,  $J_m(mn/a) = 0$ ,  $k_z = \sqrt{k^2 - k_r^2}$ ,  $k = 2\pi/\lambda$ ,  $A_0$  为磁场的幅度,  $J_m$  与  $J'_m$  分别为  $m$  阶第一类 Bessel 函数及其导数,  $r$  与  $z$  分别为径向和纵向位置,  $\phi$  为方位角度,  $J'_m$  为  $m$  阶第一类 Bessel 函数的第  $n$  个导数根,  $a$  为圆波导半径,  $k_r$  与  $k_z$  分别为径向和纵向波数,  $k$  为自由空间波数,  $\lambda$  为自由空间波长. 由于一个驻波可以分解为两个行波的叠加, 且第一类 Bessel 函数可以表示为两类 Hankel 函数之和, 于是有

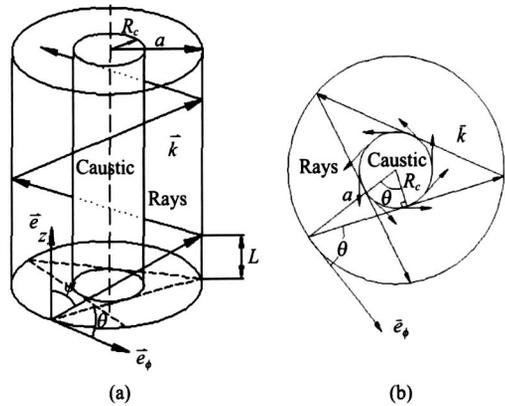


图 1 圆柱波导中波束的几何光学示意图 (a)侧面图 (b)俯视图  
Fig 1 Geometric optical description of a wave beam in a cylindrical waveguide (a) side view (b) top view

$$H_z = \frac{A_0}{2} [H_m^{(1)}(k_r r) + H_m^{(2)}(k_r r)] e^{-jn\phi} e^{-k_z z} \quad (2)$$

其中, 两类 Hankel 函数  $H_m^{(1)}(k_r r)$  和  $H_m^{(2)}(k_r r)$  分别表示向内及向外传播的行波. 对于本文研究的辐射问题而言, 仅考虑第二类 Hankel 函数  $H_m^{(2)}(k_r r)$  所代表的向外传播的行波<sup>[14]</sup>.

考虑几何光学的观点<sup>[15]</sup>, 且用平面波的叠加来表示波导中的辐射场, 波导中的行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 1 所示<sup>[14]</sup>. 物理上, 可简单形象地理解为波导中能流是以螺旋方式前行的. 利用 Hankel 函数的德拜渐近形式<sup>[16]</sup>

$$H_m^{(2)}(z) \sim \sqrt{\frac{2}{\sqrt{z^2 - m^2}}} \left\{ e^{-\sqrt{z^2 - m^2} + m \arccos \frac{m}{z} + \frac{\pi}{4}} \right\} \quad (3)$$

可求出向外传播的行波的相位 和圆波导中任意位置  $(r, \phi, z)$  处的波数矢量  $\vec{k}$

$$= -\sqrt{k_r^2 r^2 - m^2} + m \arccos \frac{m}{k_r r} + \frac{\pi}{4} - m\phi - k_z z \quad (4)$$

$$k = -\nabla = \frac{\sqrt{k_r^2 r^2 - m^2}}{r} e_r + \frac{m}{r} e_\phi + k_z e_z \quad (5)$$

这些平面电磁行波以相对于波导轴向的布里渊角 (Brillouin angle)  $\theta_B$  传播

$$\sin \theta_B = \frac{k_r}{k} \quad (6)$$

在横向平面形成焦散面, 其焦散半径为

$$R_c = a \cos \theta_B = a \frac{m}{mn} \quad (7)$$

再根据几何光学可知, 电磁行波在波导中连续两个

反射壁间沿轴向传播的距离为

$$L_B = 2a \sin \cot_B \quad (8)$$

其绕轴向转动 2 传播的轴向距离为

$$L = 2 a \cot_B \frac{\sin}{m} \quad (9)$$

为使所有平面波射线均仅被开口波导反射一次,在横向上波导开口的角度应为

$$= 2 = 2 \arccos \left( \frac{m}{m_A} \right) \quad (10)$$

于是,可设计螺旋状切割型 Vlasov 天线的纵向开口长度  $L_C = L$ ,螺旋线倾角为

$$= \arctan \left( \frac{\tan_B}{\sin} \right) \quad (11)$$

### 1.2 抛物面反射器的工作

Vlasov 模式变换器中,由开口辐射器产生的辐射必须通过抛物面反射器的聚焦和相位修正才能形成利于自由空间传输的高斯波束<sup>[6]</sup>.由于抛物面反射器的横截面形状尺寸沿轴向为常量,因此仅考虑任意轴向位置处其横截面形状即可<sup>[6]</sup>.本文为初步研究此模式变换器的辐射场,采用等效像源模型进行分析.

如图 2 所示,反射器将开口波导产生的所有波束射线反射出去而形成的辐射可看成等效像源产生的辐射,等效像源位于  $x = -2F$  处.为确定抛物面反射器形状,建立如图 3 所示的模型,由开口波导产生的波束通过抛物面反射器的聚焦后,形成平行于  $x - z$  平面的平行线波束.为了确定抛物面反射器的形状  $x = x(y)$ ,设  $R$  为点  $Q(x, y)$  到点  $P(-a \sin, a \cos)$  的距离,  $\psi$  为波束射线与  $y$  轴的夹角.分析可知,波束射线离开波导的出射范围为  $0 < \psi < 2$ ,即

$\frac{1}{2} - < < \frac{1}{2} +$ .在点  $Q(x, y)$  处有

$$\frac{dx}{dy} = \tan \frac{\psi}{2} \quad (12)$$

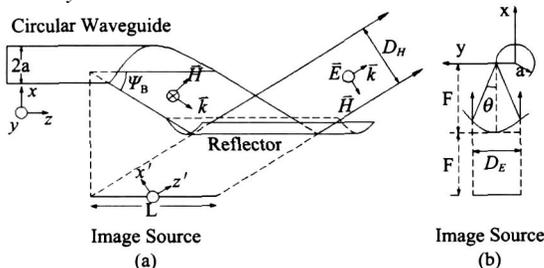


图 2 螺旋状切割型 Vlasov 模式变换器及其等效像源示意图 (a)侧面图 (b)截面图

Fig 2 The scheme of the helical cut Vlasov mode converter and the equivalent image source (a) side view (b) cross section view

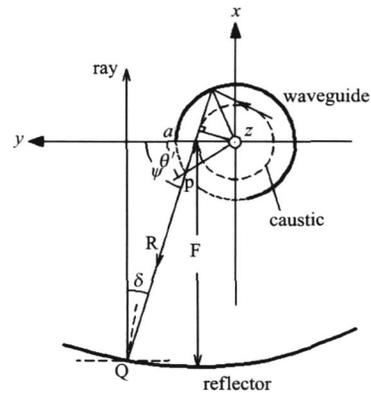


图 3 抛物面反射器截面的原理示意图

Fig 3 The principle scheme of the parabolic cylinder reflector

其中,  $\psi$  为波束射线在点  $Q$  处的反射夹角.根据几何关系,可得如下关系式

$$\frac{dx}{dy} = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{\cos} - \frac{1}{\sin} \right) \quad (13)$$

$$\begin{cases} x = -a \sin \psi - R \sin \psi \\ y = a \cos \psi - R \cos \psi \end{cases} \quad (14)$$

联立式 (13) 与 (14) 消去  $R$  和  $\psi$ , 可得

$$\begin{cases} x = a \cos(\psi + \frac{\psi}{2}) - R \sin(\psi + \frac{\psi}{2}) \\ y = a \sin(\psi + \frac{\psi}{2}) + R \cos(\psi + \frac{\psi}{2}) \end{cases} \quad (15)$$

再将式 (13) 与式 (15) 代入式 (12), 可得到如下微分方程

$$\frac{dR}{d\psi} = - (a \sin \psi + R) \frac{1 - \sin \psi}{\cos \psi} - a \cos \psi, \quad \left( \frac{1}{2} - < \psi < \frac{1}{2} + \right) \quad (16)$$

代入边界关系

$$\text{当 } \psi = \frac{1}{2} \text{ 时, } R = F - a \sin \frac{1}{2} \quad (17)$$

求解式 (16) 得微分方程, 即可最终通过式 (15) 确定此反射器的形状. 本文研究工作频率为 94GHz, 工作模式为  $TE_{6,2}$  的 W 波段回旋管, 其输出圆波导半径为  $a = 18\text{mm}$ , 取焦距  $F = 80.0\text{mm}$  (一般取  $F = 3a$  才能保证所有的反射波束远离开口辐射器<sup>[6]</sup>), 数值计算后可得到抛物面反射器的具体横截面形状, 如图 4 所示.

### 2 Vlasov 模式变换器的辐射场数值计算

按照图 2 所示的等效像源模型, 根据几何光学可知, 经反射器反射后, 等效像源沿  $z$  方向的长度为

$$L = 2 a \cot \psi = 2 a \cot_B \frac{\sin}{m} \quad (18)$$

利用几何光学可以从机理层面对 Vlasov 辐射

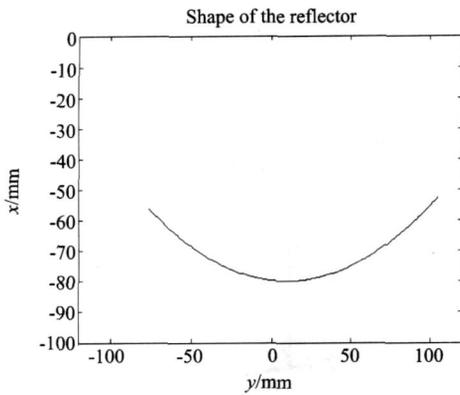


图 4 抛物面反射器的横截面形状  
Fig 4 The cross section shape of the parabolic cylinder reflector

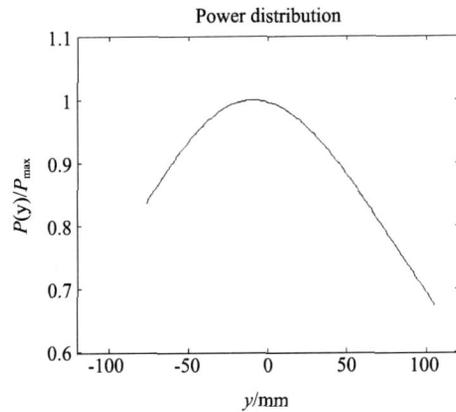


图 5 等效像源的归一化能量分布  
Fig 5 The normalized power distribution of the equivalent image source

器进行近似分析,给出其主瓣的大致方向,但无法得到更明确的场分布、增益等定量参数.在毫米波段,由于器件电尺寸较大,矢量绕射理论能综合满足计算精度和计算速度两方面的要求,故本文选择矢量绕射理论计算其辐射场.具体辐射场的计算采用 Huygens原理的 Stratton-Chu公式<sup>[13,17]</sup>

$$E = \oint_S -j\mu_0(\hat{n} \times H)g + (\hat{n} \times E) \times \nabla g + (\hat{n} \cdot E \nabla g)j dS, \quad (19)$$

式中

$$g = \frac{\exp(-jkr)}{4r}, \quad (20)$$

$$r = [(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + (z-z_0)^2]^{1/2}, \quad (21)$$

其中,  $\hat{n}$  为等效像源的单位法向矢量,  $g$  为自由空间中的 Green函数表示观测点处的物理量.

假定源场为平面波,如图 2所示,在几何光学近似条件下,该像源在  $z$  方向上是均匀的,而在  $y$  方向上是非均匀的.根据能量守恒,有

$$\frac{P_0}{2L} = -P(y)y, \quad (22)$$

其中,  $P_0$  为总辐射能量.改写 (23),有

$$P(y) = -\frac{P_0}{2L} \frac{1}{y} = -\left(\frac{P_0}{2L}\right) \frac{1}{y}, \quad (23)$$

则场的形式可表示为  $\vec{E} = (0, E_y, 0)$ ,  $\vec{H} = (H_x, 0, H_z)$ , 其中

$$E_y = \left[\frac{P_0}{2L} \frac{1}{y}\right]^2 \exp(-jk_z z),$$

$$H_x = -\frac{k_z}{k} E_y, H_z = \frac{k_r}{k} E_y. \quad (24)$$

将式 (24)代入式 (19),最终可求得观测点处的电场强度.主极化方向沿  $y$  轴方向.

按照图 3的坐标示意图,根据式 (23)可以计算等效像源的能量分布图,再利用式 (19)即可以计算辐射波束的横截面 ( $xy$ 面)场分布.计算中同样考虑工作频率为 94GHz,工作模式为  $TE_{6,2}$ 的 W 波段回旋管,其输出圆波导半径为  $a = 18\text{mm}$ ,焦距  $F = 80.0\text{mm}$ ,则可计算出相应的其它参数:  $r = 3.19\text{mm}$ ,  $\theta_{6,2} = 11.735^\circ$ ,  $\theta_B = 19.32^\circ$ ,  $L = 268.0\text{mm}$ .图 5为数值计算得到的像源归一化能量分布图,其能量呈抛物线分布.图 6为由近及远不同观测点处(分别考虑  $z = 3.098\text{m}$ ,  $z = 4.46\text{m}$  及  $z = 7.11\text{m}$ ),通过 Vlasov模式变换器后辐射波束的场分布,其中 1)为二维等值线分布,2)为相应的三维分布.结果表明,通过 Vlasov模式变换器后,94GHz回旋管中的工作模式  $TE_{6,2}$ 模被转换为高斯模式,且辐射波束具有明显的方向性,随着观测点位置由近场推进到远场(这里可以定义  $z > D_E D_H / \lambda = 6.09\text{m}$  为此的远场),在一定观测区域范围内,此波束的高斯分布场型及其场型的角向对称性变得更好,能量更集中,天线的旁瓣效应也减弱.

### 3 结论

准光模式变换器能将回旋管内工作的高阶腔体模式转换为有利于自由空间传输的线极化低阶波导模式或自由空间高斯模式,且其结构简单、紧凑高效,被广泛地用于大功率级别回旋管中. Vlasov模式变换器作为准光模式变换器的一种主要类型,在高功率微波领域受到广泛关注.本文采用几何光学模型详细研究了边廊模回旋管 Vlasov模式变换器的工作原理,利用等效像源模型结合矢量绕射理论分析了其辐射场,对于工作频率为 94GHz工作模式

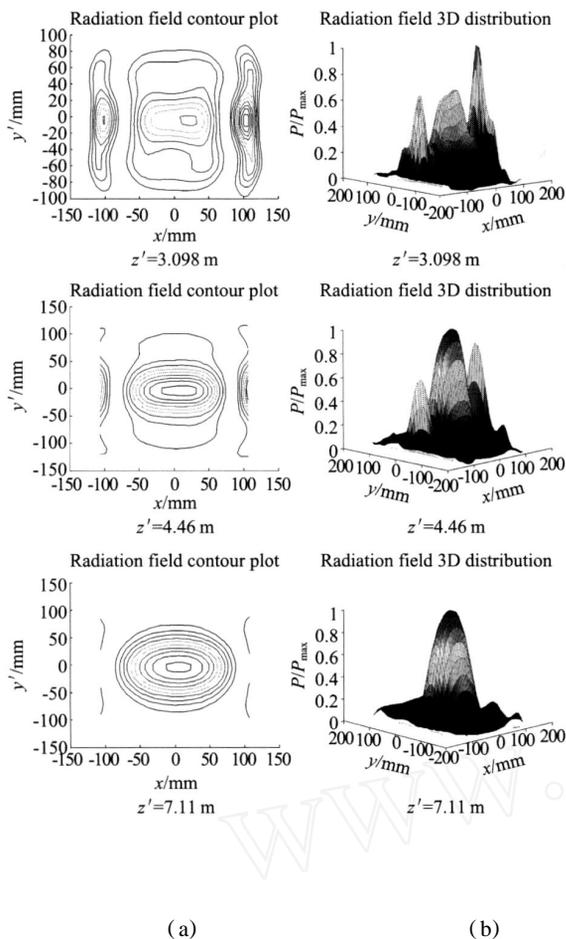


图 6 通过 Vlasov 模式变换器后辐射波束的场分布 (a) 辐射场的二维等值线分布 (b) 辐射场的三维分布

Fig 6 The field distribution of the radiated beam from the Vlasov mode converter (a) contour plots of the radiation field distribution (b) 3D plots of the radiation field distribution

为  $TE_{6,2}$  的 W 波段边廊模回旋管, 结合具体参数计算了其辐射场。数值计算结果表明, 通过 Vlasov 模式变换器后, 回旋管中的工作模式  $TE_{6,2}$  模被转换为自由空间的高斯模式, 且随着观测点位置由近场推进到远场, 此辐射波束的高斯分布场型及其场型的角向对称性变得更好, 能量更集中, 天线的旁瓣效应也减弱。这将为研究和设计 W 波段边廊模回旋管的准光输出提供理论参考。由于本计算模型未考虑抛物面反射镜金属电磁特性的影响 (如表面电流分布, 相位修正等), 所得到的辐射类高斯场仅是近似场型, 更精确的场型分布以及模式转换效率等还有待进一步研究。

## REFERENCES

[1] Thumm M. State-of-the-art of high power gyro-devices and free electron masers update 2007 [R]. Scientific Report FZ-KA 7392, Forschungszentrum Karlsruhe, Germany, 2008: 1—2

- [2] Kartikeyan M V, Borie E, Thumm M. *Gyrotrons: High power microwave and millimeter wave technology* [M]. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, New York, 2003: 1—5.
- [3] Nusinovich G S. *Introduction to the physics of gyrotrons* [M]. Johns Hopkins University Press, Baltimore and London, 2004: 1—19.
- [4] Edgcombe C J. *Gyrotron oscillators: Their principles and practice* [M]. Taylor & Francis, London, 1993: 1—8.
- [5] Lorbeck J A, Vemon R J. Singly curved dual-reflector synthesis technique applied to a quasi-optical antenna for a gyrotron with a whispering-gallery mode output [J]. *IEEE Trans Antennas Propag*, 1991, **39**(12): 1733—1741.
- [6] Mobius A W, Casey J A, Kreischer K E, et al. An improved design for quasi-optical mode conversion of whispering gallery mode gyrotron radiation [J]. *Int J. Infrared Millim. Waves*, 1992, **13**(8): 1033—1063.
- [7] N U Xin-Jian, GU Ling, YU Sheng, et al. Corrugated waveguide mode conversion for 94 GHz second-harmonic gyrotron [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (牛新建, 顾玲, 喻胜, 等. 94GHz 二次谐波回旋管波导模式转换. *红外与毫米波学报*), 2007, **26**(2): 117—120.
- [8] Vlasov S N, Zagryadskaya L I, Petelin M I. Transformation of a whispering gallery mode, propagating in a circular waveguide, into a beam of waves [J]. *Radio Eng Electron Phys*, 1975, **20**(10): 14—17.
- [9] Nakajima W M. Quasi optical reflector antennas for high power millimeter waves [C]. Proc of the EC6 Joint Workshop on ECE and ECRH. UK Oxford, 1987.
- [10] ZHOU Hai-Jing, DNG Wu, LU Qing-Xiang. Research on Vlasov-type antenna [J]. *High Power Laser and Particle Beams* (周海京, 丁武, 刘庆想. Vlasov 天线的研究. *强激光与粒子束*), 2002, **14**(3): 431—433.
- [11] LU Yong, DNG Xuan-Tong. Experimental study of a Vlasov antenna for ECRF and its inversion [J]. *Nuclear Fusion and Plasma Physics* (刘永, 丁玄同. 一种新型的 ECRF 天线——Vlasov 天线及其逆过程的试验研究. *核聚变与等离子体物理*), 1991, **11**(1): 38—44.
- [12] Ogawa I, Sakai A, Kihara T, et al. Application of the complex beam parameter to the design of a quasi-optical transmission line for a submillimeter wave gyrotron [J]. *Int J. Electronics*, 1999, **86**(9): 1071—1084.
- [13] Blank M. High efficiency quasi-optical mode converters for overmoded gyrotrons [D]. PhD thesis, Massachusetts Institute of Technology, 1994.
- [14] Jin Jian-Ba. Quasi-optical mode converter for a coaxial cavity gyrotron [D]. Southwest jiaotong university doctor degree dissertation (金践波. 同轴腔回旋管准光模式转换器. 西南交通大学博士论文), 2005.
- [15] Weinstein L A. *Open resonators and open waveguides* [M]. Golen Press, Boulder, Colorado, 1969 (徐承和, 刘国政, 廖正久译. 开放腔与开放波导, 北京: 科学出版社), 1987: 110—114.
- [16] Erdelyi A. *Higher transcendental functions* [M]. McGRAW-HILL Book Company, New York, 1953: 85—86 (张致中译. 高级超越函数. 上海: 科学技术出版社), 1958: 89—102.
- [17] Kong J A. *Electromagnetic wave theory* [M]. John Wiley & Sons, New York, 1986 (吴季等译. 电磁波理论. 北京: 电子工业出版社), 2003: 391—392.