

94 GHz TE_{5,3} 准光辐射器

吴泽威, 李浩, 徐建华, 李天明, 李家胤
(电子科技大学物理电子学院, 四川成都 610054)

摘要:基于耦合波理论和相位匹配技术,对准光辐射器的传统设计方法进行了改进,使其适用于低阶模式的设计.通过调节耦合时模式间的相位,在切口处实现了具有高斯场分布的理想模式组合.利用这一方法,优化设计了一个94 GHz, TE_{5,3}回旋管准光辐射器.数值模拟结果表明,设计的辐射器在切口处形成了一个良好的束斑,边馈电平达到-30 dB,口径场高斯含量高于98%.

关键词:94回旋管;模式变换器;准光技术
中图分类号:TN811;TN814 **文献标识码:**A

A quasi-optical mode launcher for 94 GHz, TE_{5,3} gyrotrons

WU Ze-Wei, LI Hao, XU Jian-Hua, LI Tian-Ming, LI Jia-Yin
(School of Physical Electronics, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

Abstract: Based on the coupled-wave theory and the phase-matching technique, an improved method for low-order quasi-optical mode launcher is presented. Adjusting the phase difference between the working mode and its satellite modes, an ideal mixture mode with the features of Gaussian field distribution was obtained. Using the proposed method, a 94 GHz TE_{5,3} quasi-optical mode launcher was synthesized. The numerical calculation shows that the difference between the edge and peak values of field intensity reaches 30 dB. A well-focused field at the aperture with a Gaussian mode content of more than 98% can be obtained, which will reduce drastically the diffraction losses and reflection of power from the cuts.

Key words: 94 GHz gyrotrons, TE_{5,3}, mode converter, quasi-optical technology
PACS: 41.20.Jb; 42.25.Bs

引言

准光模式转换器可以将高阶边廊模式或者体模转换成适于直接应用和传输的准高斯波束,是高功率回旋管的重要组成部分^[1-3].准光模式转换器由波导辐射器和若干镜面组成,其中波导辐射器是准光模式转换器的初级辐射源,在实现注波分离的同时,将轴向传播的波束转换成侧向辐射的准高斯波束.因此,波导辐射器对整个准光模式转换器的性能起着决定作用.Vlasov辐射器^[4]边缘衍射损耗严重,在高功率情况下尤其是工作水平达兆瓦级时,这种损耗给冷却工作带来严重的技术难题.为降低衍射损耗,提高输出波束高斯模式

含量,Denisov等改进了辐射器结构,通过预先调制辐射器内波束的方式来降低辐射切口边缘场,实现波束的高效输出^[5-6].由于国外正致力于发展兆瓦量级的高功率回旋管,高阶准光模式输出系统的研究得到了很好的发展.德国、俄罗斯、日本等国家已经成功设计了TE_{34,19},TE_{22,6},TE_{28,8}等高阶准光模式转换器.实验结果表明,这些准光模式转换器的输出波束高斯含量可达95%以上^[7-9].当前,国内对于高功率微波准光输出的研究主要集中在对Vlasov准光模式转换器的研究,这种设计方法理论转换效率不足85.7%^[10-12].

较高阶模式而言,低阶模式存在波导过模程度、模式特性等诸多不同.应用传统的设计方法,在辐射

收稿日期:2013-01-15,修回日期:2013-09-09

Received date: 2013-01-15, revised date: 2013-09-09

基金项目:中央高校基本科研业务专项基金(103.1.2E022050205)

Foundation items: Fundamental Research Funds for the Central Universities(103.1.2E022050205)

作者简介(Biography):吴泽威(1987-),男,湖南湘乡人,博士研究生,主要研究内容为高功率准光传输技术. E-mail: WZW.198704@163.com

切口处难以实现具有准高斯特性的理想模式组合,对 94 GHz TE_{6,2}的优化结果显示切割边缘电流幅值只能降低到汇聚点的 10%^[13]. 为了提升 Denisov 辐射器工作在低阶模式时的性能,对准光辐射器的设计进行了进一步的研究. 首先,分析了传统方法设计低阶模式变换器存在的问题. 针对工作模式与其卫星模式间存在的相位不匹配的现象,提出了通过改变传输模式间的相位来产生理想模式组合方法. 利用这一方法,对 94 GHz TE_{5,3}准光模式辐射器进行了设计,并讨论了设计结果. 最后,利用仿真软件验证了设计的准光辐射器.

1 Denisov 辐射器的设计与分析

为了分析传统方法对低阶模式 Denisov 辐射器设计的适用性,首先对传统的设计方法进行简单介绍. 一维高斯场分布可以近似用升余弦函数表示^[5-6]:

$$\frac{\sqrt{2}}{\sqrt{\pi\omega}} \exp(-2z^2/\omega^2) \approx \frac{b}{3\pi} (1 + \cos bz)^2, \quad (1)$$

当 $\omega b = 1.76$ 时,两者的相似度可达 99.703%. 将升余弦函数进一步表示成三个部分的组合:

$$f(z) = 1 + \cos bz = \left(1 + \frac{1}{2} \exp(ibz)\right) + \frac{1}{2} \exp(-ibz). \quad (2)$$

这样,一维高斯场分布就可以通过三个波导模式的组合来实现. 因此,在轴向和角向分别用波导模式场分布对高斯场进行展开,就可以得到场分布高度集中的模式组合,从而有效降低边缘损耗. 表 1 给出了展开后的波导模式组合及其幅值关系.

表 1 组合成准高斯分布的模式及相对功率分布表
Table 1 Set of TE modes to generate a Gaussian-like field distribution and its relative ration

		角向群聚		
轴 向 群 聚	TE _{m-Δm+1,n+1}	$\frac{1}{36}$	TE _{m+Δm,n}	$\frac{1}{9}$
	TE _{m-Δm+1,n+1}	$\frac{1}{9}$	TE _{m,n}	$\frac{4}{9}$
	TE _{m-Δm-1,n+1}	$\frac{1}{36}$	TE _{m-Δm,n}	$\frac{1}{9}$
			TE _{m+Δm+1,n-1}	$\frac{1}{36}$
			TE _{m+Δm+1,n-1}	$\frac{1}{9}$
			TE _{m+Δm-1,n-1}	$\frac{1}{36}$

在展开时,角向与轴向变化模式的选择依据是^[6]:

$$\Delta\beta = \pm \frac{2\pi}{L_B}, \Delta m = \frac{\pi}{\theta}, \quad (3)$$

其中,

$$\cos\theta = m/X_{m,n} = R_c/a,$$

L_B 为辐射口长度, m 为角向变化数目, $X_{m,n}$ 为 m 阶贝塞尔函数的根, R_c 和 a 分别表示散焦半径和波导半径.

为了得到上述具有准高斯性质的混合模式,根据模式选择规则,同时考虑抑制反射波和一些不必要的寄生模式,通常采用半径渐张的微扰波导结构实现所需的模式组合:

$$R(\phi, z) = a + \alpha z + \delta_1 \cos(\Delta\beta_1 z - \Delta m_1 \phi) + \delta_2 \cos(\Delta\beta_2 z - \Delta m_2 \phi), \quad (4)$$

其中, α 为倾斜因子, δ_1 和 δ_2 为波纹扰动因子, $\Delta\beta, \Delta m$ 分别表示实现模式耦合时的轴向与角向的拍波条件. 对于特定的工作模式 TE_{m,n} 而言,贝塞尔函数的根值与其相邻两个卫星模式的根值差存在差别. 这种差别会导致耦合卫星模式时存在两个 $\Delta\beta$ 值. 对于高阶模式而言,根据贝塞尔函数的 Debye 近似理论,工作模式与其卫星模式的贝塞尔根值满足如下关系^[14]:

$$\Delta X_{m,n} = -\frac{1}{2} \frac{(\Delta m)^2}{X_{m,n}^2 - m^2} X_{m,n}, \quad (5)$$

即卫星模式的贝塞尔函数的根值会近似的均匀分布在工作模式根值的两边. 高阶工作模式与卫星模式根值间这种微弱的差别,可以通过取拍波条件为两者传播波常数的平均值来实现向相邻卫星模式的耦合:

$$\Delta\beta_1 = \frac{1}{2} (\beta_{m-\Delta m, n+1} - \beta_{m+\Delta m, n-1}) \quad (6)$$

$$\Delta\beta_2 = \frac{1}{2} (\beta_{m-1, n} - \beta_{m+1, n})$$

这种做法可以很好地实现高阶工作模式的理想模式组合输出. 但是对于低阶模式而言, Debye 近似理论已不再适用. 卫星模式与工作模式的根值差别明显,从而导致模式间的传播波数差显著,最终使得耦合时相位不匹配,不能实现向卫星模式的耦合. 表 2 给出了三组不同情况工作模式及其卫星模式的传播常数,其中低阶模式 TE_{5,3}的工作半径为 9 mm. 显然,较高阶模式而言,低阶模式与其卫星模式之间的传播常数的差别显著. 以角向为例, TE_{5,3}与卫星模式的传播差值为 0.108 5 rad/mm 和 0.018 5 rad/mm,而 TE_{22,6}与 TE_{28,8}之间的传播常数差分别为 0.022 3 rad/mm 和 0.007 8 rad/mm、0.026 3 rad/mm 和 0.004 4 rad/mm. 这种显著差别的存在会导致模式间的相位发生变化,使得相邻卫星模式的耦合能力出现较大差别. 因此,在低阶工作模式情况下,传

表 2 不同情况下的组成高斯分布的混合模式的传播常数的对比分布表

Table 2 Comparison of propagation constant among set of TE modes that could generate a Gaussian-like field distribution under different condition

	94 GHz, TE _{5,3} 模				118 GHz, TE _{22,6}			140 GHz, TE _{28,8}	
传播常数/ (rad/mm)	1.477 9	1.374 9	1.345 8	0.811 5	0.789 1	0.803 6	0.897 3	0.869 3	0.867 9
	1.317 0	1.208 5	1.190	0.973 0	0.950 7	0.958 5	1.058 8	1.032 5	1.028 1
	1.117 8	0.999 0	0.995 5	1.108 4	1.085 7	1.088 7	1.196 5	1.170 9	1.164 3

统高阶模式辐射器的设计方法难以耦合出理想的混合模式. 图 1 为采用传统方法经大量计算后得到的最优结果. 与理想模式组合进行比较, 虽然工作模式 TE_{5,3} 成分与理想值的绝对误差为 0.7%, 但是轴向卫星模式与角向卫星模式之间的成分差分别达到了 4.45%、1.591%. 传播常数之间的这种显著的差别使得低阶准光模式辐射器的设计更具难度.

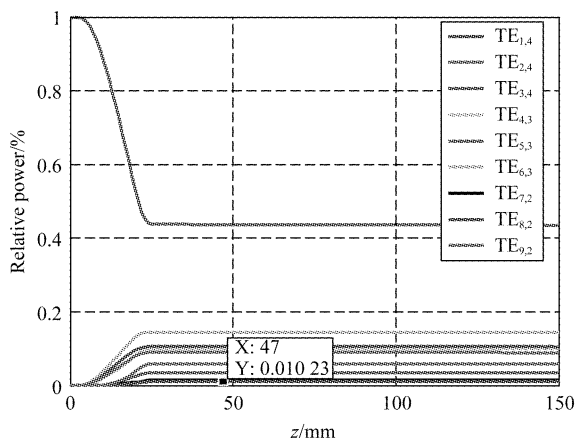


图 1 采用传统方法设计得到的模式成分分布

Fig. 1 The obtained mode composition (relative power) coefficients using the traditional method

2 改进型设计方法的提出

根据耦合波理论可知, 采用微扰结构实现模式耦合时, 模式间的相位差模式对耦合的进行有着重要影响. 低阶工作模式与其卫星模式之间传播常数之间的差异, 会导致相位的不匹配来影响模式间的耦合. 借鉴相位重匹配的思路^[15], 寻求到了一种可以提高弱过模情况下低阶工作模式与其卫星模式间的耦合方法. 这种方法可以实现理想混合模式的输出, 达到降低边缘损耗的目的.

在模式耦合过程中, 模式间的耦合强弱由耦合系数决定(由于工作模式是 TE_{m,n} 模式, 本文仅考虑 TE_{m,n} 模式之间的耦合), 耦合系数的表达式为^[6]:

$$C(z) = K_{k,l} \frac{\delta_n \exp(j\Delta\beta_h z)}{2R(z)}, \quad (9)$$

其中

$$K_{k,l} = \frac{mn(k_0^2 - \beta_{m,p}\beta_{n,q}) - \left(\frac{X_{mp} - X_{nq}}{R(z)}\right)}{\sqrt{\beta_{m,p}\beta_{n,q}}(X_{mp}^2 - m^2)(X_{nq}^2 - n^2)}$$

显然, 对于特定的两个模式 TE_{m,p} 和 TE_{n,p}, 耦合能力的强弱取决于 δ_n 和其纵向拍波条件 $\Delta\beta_h$. δ_n 的取值对工作模式往同一方向的卫星模式(比如角向模式 TE_{m+\Delta m, n-1} 和 TE_{m-\Delta m, n+1}) 的耦合影响一致. 但对于 $\Delta\beta_h$ 而言, 其值直接影响耦合时的相位, 从而决定模式间的耦合状态. 因此, 我们可以通过变化 $\Delta\beta_h$ 值来改变模式间的耦合. 设

$$\Delta\beta_1 = \varepsilon_1 (\beta_{m-\Delta m, n+1} - \beta_{m+\Delta m, n-1}) \quad (10)$$

$$\Delta\beta_2 = \varepsilon_2 (\beta_{m-1, n} - \beta_{m+1, n})$$

其中, $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ 为相差因子, 且 $0 < \varepsilon_1 < 1, 0 < \varepsilon_2 < 1$. 在实际中, 只要改变相差因子, 就可以实现拍波因子 $\Delta\beta_h$ 的变化.

从上述分析过程可知, 这种改变拍波条件的方法可以通过改变耦合模式间的相位, 实现利于实现目标模式比例的输出. 基于这种方法, 对 94 GHz, TE_{5,3} 模式进行了优化设计.

3 数值优化与结果分析

采用微扰结构实现模式的耦合, 最终都是通过求解耦合波方程组的边值问题实现的. 耦合波方程的基本形式为:

$$\frac{dA_i^\pm}{dz} = \mp j\gamma_i A_i^\pm - \frac{1}{2} \frac{d \ln \gamma_i}{dz} A_i^\pm + C_{ik}^\pm \sum_k A^{k+} + C_{ik}^\pm \sum_k A^{k-}, \quad (11)$$

上式中“+”和“-”分别表示电磁波的正向和反向传输, A_i 为传播的各个模式的幅值, C 是各个模式之间的耦合系数, $\gamma = \alpha + i\beta$ 是模式的传播常数, α 为衰减系数, β 为相位常数.

建立以波纹扰动因子、扰动位置起始位置、扰动长度、相差因子等多参数的数值计算模型, 以输出模式所占比例与理想值的相对偏移量的乘积作为目标函数, 具体的数字表达式如下:

$$F = \sum_{k=1}^9 \omega_k |A_k - T_k| \quad (12)$$

其中 ω_k 为各模式成分所占比例的权值, A_k, T_k 分别

表示计算得到的各模式所占的成分和理想值. 编写数值程序寻找目标函数的最小值. 当 $\varepsilon_1 = 0.352$, $\varepsilon_2 = 0.753$, 得到了能基本实现高效率准光输出的结构, 其结构示意图见图 2. 设计的辐射器波导内壁最大扰动不超过 0.293 mm, 扰动长度为 25 mm, 辐射器总长度 60 mm, 这有利于将辐射器置于回旋管内, 实现器件的紧凑化设计.

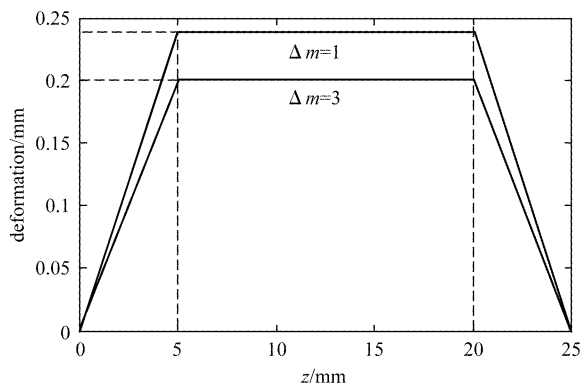


图 2 纹波导辐射器壁扰动示意图
Fig. 2 Schematic diagram of wall deformation of the dimpled-wall launcher

图 3 为辐射器内模式的变化情况, 由于波导半径的微扰, 输入模式 TE_{5,3} 被逐渐耦合到其他八个卫星模式. 在 $z = 25$ mm 时, 各模式成分基本达到了理想的比例关系, 如表 3 所示, 验证了改变耦合时的相位来设计低阶准光辐射器方法的有效性.

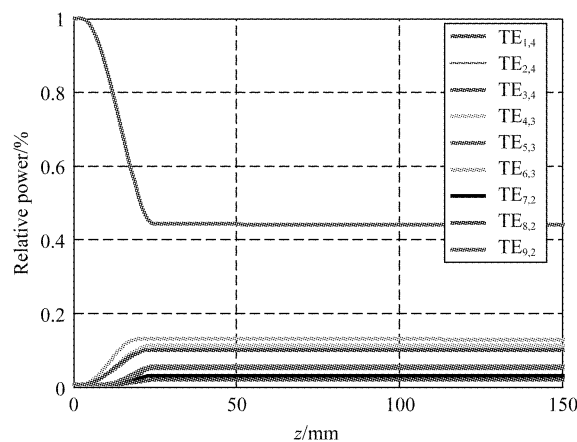


图 3 模式成分在辐射器内部沿轴向的变化曲线
Fig. 3 Mode composition (relative power) coefficients vary along the z-axis of the launcher

随着卫星模式的产生和相位的匹配, 波导内壁上的场不断被集中, 图 4 显示了辐射器壁上场的变化情况. 在切口处, 辐射场的中心值与切割边缘处的

表 3 辐射器切口处输出模式的相对功率分布
Table 3 Relative power of the output modes at the aperture of the launcher

轴 向 聚 束	角向聚束		
	TE _{3,4} 4.498%	TE _{6,3} 12.45%	TE _{9,2} 5.019%
TE _{2,4} 9.926%	TE _{5,3} 43.66%	TE _{8,2} 9.556%	
TE _{1,4} 1.322%	TE _{4,3} 10.75%	TE _{7,2} 2.409%	

差值可达 30 dB, 表明产生的混合模式已经实现了很好的集中. 这样高度集中的场可以有效地降低由于切口影响带来的寄生辐射和杂散损耗, 从而实现高功率微波的高效输出. 同时, 高度集中的壁电流分布反映了所提出的设计方法的有效性. 图中直线为设计的辐射器切口的形状及位置.

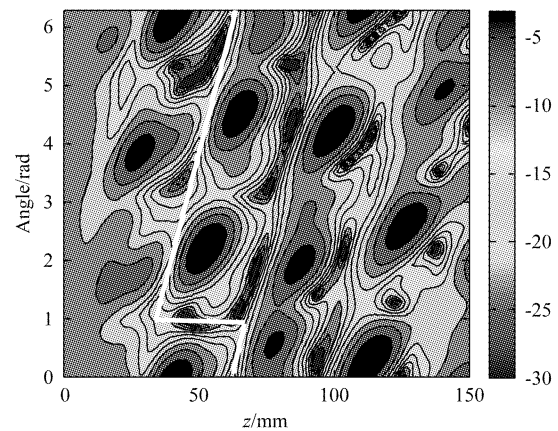


图 4 波导壁上电流的分布情况, 其中白线表示辐射器切口
Fig. 4 The current distribution on the unfolded wall of the launcher, the edges of the launcher cut is indicated in white line

切口辐射场的二维等值分布图如图 5 所示, 其中实线为理想高斯分布等势线, 虚线为辐射场等势线. 为了表征辐射器输出波束的高斯含量, 定义切口处的辐射场与理想高斯束的相似性为辐射口的高斯含量 η_s , 数学表达式为^[6]:

$$\eta_s = \frac{\int |u_1| \cdot |u_2| ds}{\sqrt{\int |u_1|^2 ds \cdot \int |u_2|^2 ds}} \quad (12)$$

其中, u_1, u_2 分别表示切口处辐射出来的场和理想的高斯场. 经计算, 得到了设计的辐射器输出的波束高斯含量为 98.28%, 与传统的 Vlasov 模式变换器相比较, 输出高斯波束含量有了显著提高, 这将对提高回旋管整体性能有着积极的意义.

为了验证计算结果的可靠性, 用电磁仿真软件 Feko^[16] 对设计的辐射器进行了计算, 并与 Vlasov 辐

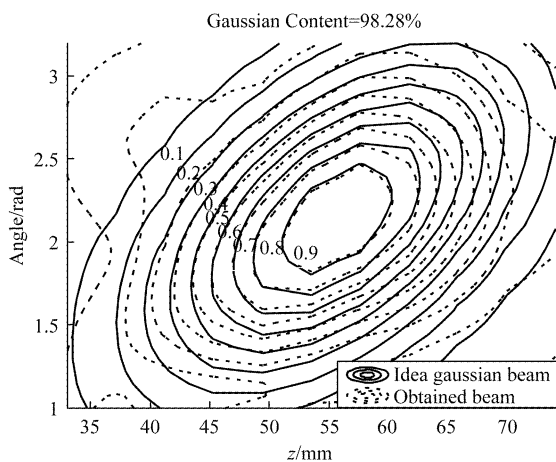


图5 切口处的辐射场与理想高斯场的场分布等势图,其中实线为理想高斯分布,虚线为计算结果

Fig. 5 Contour of the strength of the field at the aperture of launcher in a linear step of 0.1, the solid and dashed lines represent the obtained and ideal Gaussian distribution, respectively

射器进行了对比. 电磁软件仿真结果与编写的数值计算程序结果基本一直. 由远场辐射图可知(见图6),设计的辐射器在方位角方向上,归一化副瓣为 -27 dB,在俯仰角方向,旁瓣增益低于主瓣 23 dB. 而Vlasov辐射器在方位角和俯仰角上的归一化副瓣均只有 -15 dB. 同时,在方位角上Vlasov辐射器 3 dB束宽可达,远大于设计的辐射器的. 显然,设计的辐射器较Vlasov辐射器而言,切口辐射的波束更加集中,这样不仅有利于降低输出系统的冷却难度,提高输出功率,同时也降低了后续镜面的设计难度.

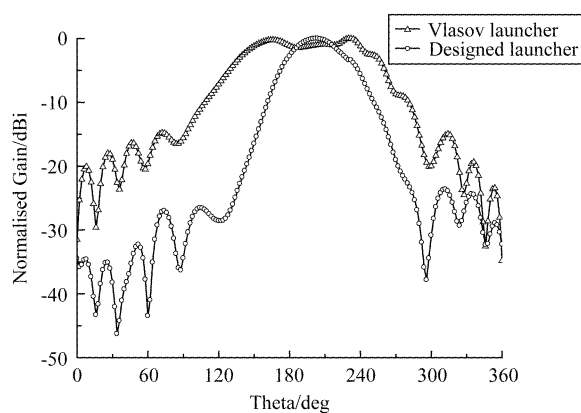
4 结论

应用波导场理论对传统方法设计低阶准光模式辐射器进行了研究,分析了这种方法存在的问题,并提出了改进办法. 编制分析与优化 $TE_{5,3}$ 辐射器的计算程序,可以快速有效的设计出高效率的模式变换器. 结果表明,设计的辐射器可以将波导模式转换成较好的高斯波束,在辐射口的高斯模式含量达到了 98.28% ,电磁仿真结果与数值计算结果吻合良好. 研究结果可为回旋管准光输出系统的设计提供技术参考.

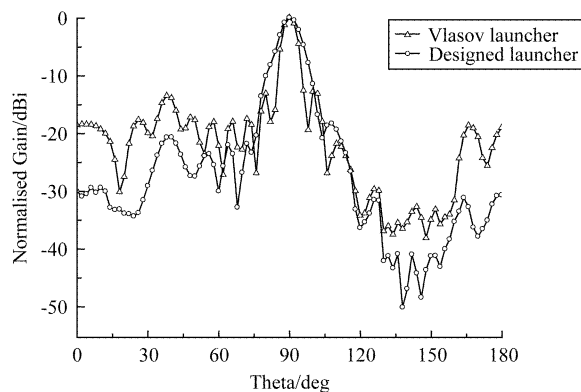
致谢:感谢德国卡尔斯鲁厄理工学院脉冲功率和微波技术研究所的金践波博士的交流.

References

[1] Kumar N, Singh U, Singh T P, et al. A review on the applications of high power, high frequency microwave source;



(a)



(b)

图6 辐射器的远场辐射图(a)为方位角方向,(b)为俯仰角方向

Fig. 6 Far-field radiation pattern of the launcher (a) the azimuth direction, and (b) the pitching angle direction

Gyrotron[J]. *Journal of Fusion Energy*, 2011, **30**(4): 257-276.

[2] Thumm M K, Kasperek W. Passive high-power microwave components [J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2002, **30**(3): 755-786.

[3] Manfred K A Thumm. Recent developments on high-power gyrotrons—introduction to this special issue[J]. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Wave*, 2011, **32**(3): 241-252.

[4] Vlasov S N, Orlova I M. Quasioptical transformer which transforms the waves in a waveguide having a circular cross section into a highly directional wave beam [J], *Radiophysics and Quantum Electronics*. 1974, **11**(7): 115-119.

[5] Denisov G G, Kuftin A N, Malygin V I, et al. 110 GHz gyrotron with built-in high efficiency converter[J]. *International Journal of Electronics*, 1992, **72**(5): 1079 - 1091.

[6] Jin J B. Quasi-optical mode converter for a coaxial cavity gyrotron[D]. *Southwest jiaotong university*, 2005.

[7] Chirkov A V, Denisov G G, Kulygin M L, et al. Use of Huygens' principle for analysis and synthesis of the fields in oversized waveguides[J], *Radiophysics and Quantum Electronics*, 2006, **49**(5): 344-353.

[8] Tomasz R, Jin J B, Bernard P, et al. 170 GHz, 2MW, coaxial cavity gyrotron: design and experimental verification of

- the RF output system [C]. *Proc. 6th International Vacuum Electronics Conference IVEC 2005*, Noordwijk, Netherland, 2005:303-306.
- [9] Minami R, Kariya T, Imal T, *et al.* Development of 28 GHz and 77 GHz, Mega-Watt gyrotrons for fusion devices [J]. *Journal of Infrared, Millimeter and Terahertz Waves*, 2011, **32**(3):295-310.
- [10] LI Hao, WANG Hai-Yang, LI Tian-Ming, *et al.* W-band quasi-optical TE_{62} - TEM_{00} mode converter [J], *High Power Laser and Particle Beams* (李浩,汪海洋,李天明,等, W 波段 TE_{61} - TEM 准光模式变换器. *强激光与粒子束*), 2011, **23**(11): 3112-3116.
- [11] WANG Bin, LIU Pu-Kun, GENG Zhi-Hui. Investigation on radiation from a vlasov mode converter for w-band whispering gallery mode gyrotron [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves* (王斌,刘濮鲲,耿志辉. W 波段边廊模回旋管 Vlasov 模式变换器的辐射. *红外与毫米波学报*), 2010, **29**(2):100-113.
- [12] NIU Xin-Jian, GU Ling, YU Xin-Hua, *et al.* A $TE_{6,2}$ 94 GHz inner quasi-optical mode converter [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves* (牛新建,顾玲,于新华,等, 94 GHz $TE_{6,2}$ 模内置准光模式变换器. *红外与毫米波学报*), 2011, **30**(5): 429-445.
- [13] ZHANG Wei, Study of Denisov launcher and waveguide polarizer. Chengdou [D]. *University of electronic science and technology of China* (张伟. Denisov 辐射器与波导圆极化器技术研究. 成都:电子科技大学), 2010.
- [14] Bogdashov A A, Denisov G G. Asymptotic theory of high-efficiency converters of higher-order waveguide modes into eigenwaves of open mirror lines [J]. *Radiophysics and Quantum Electronics*, 2004, **47**(4): 283-296.
- [15] Thumm M. High power mode conversion for linearly polarized HE₁₁ hybrid mode output [J]. *Int. J. Electron.*, 1982, **61**(6):1135-1153.
- [16] <http://www.feko.info/>