

34 GHz TE_{01} 模基波回旋速调管高频系统设计与实验

徐勇, 罗勇, 王建勋, 王丽, 蒲友雷, 李宏福
(电子科技大学物理电子学院, 四川成都 610054)

摘要:利用场匹配理论,建立了具有突变结构谐振腔的级联散射矩阵.通过数值计算,完成了 Ka 波段 TE_{01} 模回旋速调管的输入腔、群聚腔、输出腔的设计与制作.同时给出了一支 Ka 波段 TE_{01} 模四腔基波回旋速调管高频系统和整管的优化设计方案.PIC 模拟表明:在中心频率 34 GHz、注电压 70 kV、注电流 11 A 的情况下,获得了输出功率 390 kW,饱和增益 42.9 dB,电子效率 50.6%,3 dB 输出带宽 360 MHz 的结果.通过样管的热测实验显示在 34 GHz,注电压 70 kV,注电流 11 A,获得了 301 kW 的稳定输出脉冲峰值功率,41.8 dB 的增益,39.1% 的效率,285 MHz 的 3 dB 输出带宽.

关键词:回旋速调管;注-波相互作用;高功率毫米波
中图分类号:TN722;TN129 **文献标识码:**A

Design and experiment of high frequency circuit: fundamental wave gyrokystron amplifier with 34 GHz TE_{01} mode

XU Yong, LUO Yong, WANG Jian-Xun, WANG Li, PU You-Lei, LI Hong-Fu
(School of Physical Electronics, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

Abstract: The scattering matrix for the cavity with abrupt changes in radius in the gyrokystron was built with the mode-matching technique. The cavities for input, bunching and output of the Ka-band TE_{01} mode in the gyrokystron have been designed and fabricated. The designed amplifier, as indicated by the PIC simulation, was expected to produce 390 kW peak output power, saturated gains of 42.9 dB and 50.6% efficiency at center frequency 34 GHz and 70kV, 11A annular electron beam. The full width half maximum (FWHM) bandwidth is greater than 360 MHz. The hot test shows that the fabricated gyrokystron amplifier has actually produced 301 kW peak output power, 39.1% efficiency and saturated gains of 41.8 dB at center frequency 34 GHz and 70 kV, 11 A annular electron beam. The full width half maximum (FWHM) bandwidth is greater than 285 MHz.

Key words: gyrokystron, beam and wave interaction, high power millimeter wave
PACS: 84.47.+W, 84.40.Fe, 84.40.Az, 41.20.Jb

引言

回旋速调管由于其功率大、效率和增益高、磁场装置紧凑、有一定带宽且性能较稳定,在高功率毫米波雷达、高梯度加速器、下一代直线对撞机中都具有重要的应用前景,因而在国际上倍受重视^[1-7].美、俄等军事大国投入了大量的人力、物力、财力在该领域进行研发,取得了一系列的研究成果^[1-2].其中,国际上最具代表性的研究成果包括:俄罗斯科学院应用物理研究所(IAP)研制的一支 Ka 波段二腔回旋速

调管,峰值功率达 750 kW,平均功率 5 kW、增益 20 dB、效率 24%、带宽 0.6%.美国海军研究室研制的一支 W 波段回旋速调管,峰值功率为 92 kW、平均功率 10 kW、增益 32 dB、效率 33.5%.可见回旋速调管能在毫米波段实现高功率、高增益、高效率.国内对回旋速调管的研制工作起步较晚,国内从事回旋速调管研究的单位主要有电子科技大学和中科院电子所.经过数年的研究,国内在回旋速调管研究上取得了一系列的成果^[3-6],但与国外的研究水平还有差距,相关研究工作还有待进一步展开.高频腔

收稿日期:2012-07-25,修回日期:2013-04-11
基金项目:国家自然科学基金(61101040)

Received date: 2012-07-25, revised date: 2013-04-11

Foundation items: Supported by National Natural Science Foundation of China (61101040)

作者简介 (Biography): 徐勇(1977-),男,四川崇州人,讲师,博士,主要研究领域为高功率微波毫米波技术、高功率回旋管器件研究. E-mail: xuyong01@uestc.edu.cn

体系统是回旋速调管研究的基础,可以给出初步的高频结构和尺寸.国外多采用 HFSS 软件进行分析和计算^[7],但单独利用 HFSS 对高频腔体系统设计分析非常耗时,设计周期较长.通过对高频腔体系统的理论分析计算,可以快速给出高频腔体的初始结构尺寸参数,再借助 HFSS 软件进行优化仿真,大大缩短了回旋速调管高频腔体系统的设计周期.在优化设计的基础上,给出了一支回旋速调管高频系统的设计参数. PIC 模拟表明:该管获得了较高的稳定输出功率、增益和效率、输出带宽.最后,研制了实验样管,并完成了初步热测实验工作.

1 具有突变结构谐振腔的场匹配分析

回旋速调管的谐振腔是具有突变结构波导谐振腔,可利用场匹配理论对其进行分析.

如图 1 所示,假设波导突变两侧存在有一系列的入射波和散射波,其中 F_1 、 F_2 分别代表一区和二区中的入射波(朝向突变面)的模式幅值, B_1 、 B_2 分别代表一区和二区中的散射波(背向突变面)的模式幅值:

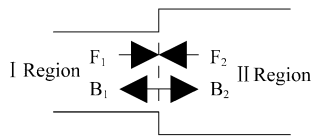


图 1 规则波导突变结构及传输模式图
Fig. 1 Transmitting modes at abrupt bend of a regular waveguide

将突变结构两边的横向电磁场 E 和 H 展开,对一区和二区分别有:

$$\begin{aligned} E_1 &= \sum_{i=1}^M \sqrt{Z_{i1}} (F_{i1} + B_{i1}) e_{i1} \\ H_1 &= \sum_{i=1}^M \left(\frac{F_{i1} - B_{i1}}{\sqrt{Z_{i1}}} \right) h_{i1} \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} E_2 &= \sum_{j=1}^N \sqrt{Z_{j2}} (F_{j2} + B_{j2}) e_{j2} \\ H_2 &= \sum_{j=1}^N \left(\frac{F_{j2} - B_{j2}}{\sqrt{Z_{j2}}} \right) h_{j2} \end{aligned} \quad (2)$$

式中, Z 为特征阻抗, e 、 h 分别代表电波、磁波的波矢量函数, M 、 N 为选取的模式数,角标 1、2 分别代表所属区域为一区和二区.

由突变处电场与磁场满足连续性条件,可得:

$$\begin{aligned} J[F_1 + B_1] &= R[F_2 + B_2] \\ I[F_1 - B_1] &= -Z_1 P^T Y_2 [F_2 - B_2] \end{aligned} \quad (3)$$

其中, I 代表单位阵, F 和 B 为由选取的模式行波幅值系数组成的矩阵, Z_1 为一区包含模式阻抗系数的 $M \times M$ 阶对角线矩阵, Y_2 为二区包含模式导纳系数的 $N \times N$ 阶对角线矩阵, R 为传输系数矩阵, $R_{ij} = \iint_{S_0} \bar{e}_{i1} \bar{e}_{j2}^* ds$, P 为耦合系数矩阵, $R_{ji} = \iint_{S_0} \bar{e}_{j2} \bar{e}_{i1}^* ds$, R 矩阵与 P 矩阵为转置关系. S_0 为突变处小波导的横截面的面积.

由突变处电场与磁场的连续性,归一化可得:

$$I[F_1 + B_1] = \sqrt{Y_1 R} \sqrt{Z_2} [F_2 + B_2] \quad (4)$$

$$I[F_1 - B_1] = \sqrt{Z_1 R} \sqrt{Y_2} [B_2 - F_2]$$

进而可得波导中模式耦合的单级散射矩阵:

$$\begin{pmatrix} B_1 \\ B_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} F_1 \\ F_2 \end{pmatrix} \quad (5)$$

式中, $S_{11} = [I + P1]^{-1} [I - P1]$, $S_{12} = 2 \times [I + P1]^{-1} P0$, $S_{21} = 2 \times [I + P2]^{-1} PN$, $P0 = \sqrt{Z_1 R} \sqrt{Y_2}$, $P1 = P0 \times PN$, $S_{22} = -[I + P2]^{-1} PN$, $PN = \sqrt{Y_2 R}^{-1} \sqrt{Z_1}$, $P2 = PN \times P0$. 假设一区中 TM 波的其中一个模式的传输系数 $\gamma \rightarrow 0$, 则该模式的 $Z_{i1} \rightarrow 0$, 将突变结构两边的横向电磁场 E 和 H 展开, 对一区和二区分别有:

$$E_1 = \sum_{i=1}^M Z_{i1} (F_{i1} + B_{i1}) e_{i1}, H_1 = \sum_{i=1}^M (F_{i1} - B_{i1}) h_{i1} \quad (6)$$

$$E_2 = \sum_{j=1}^N Z_{j2} (F_{j2} + B_{j2}) e_{j2}, H_2 = \sum_{j=1}^N (F_{j2} - B_{j2}) h_{j2} \quad (7)$$

由电场与磁场满足的连续性条件,有

$$I[F_1 - B_1] = R[B_2 - F_2],$$

$$Y_2 P Z_1 [F_1 + B_1] = I[F_2 + B_2] \quad (8)$$

令: $A_0 = Y_2 P Z_1$, $B_0 = [P + A]^{-1}$, $C_0 = A \times R$,

$D_0 = [C + I]^{-1}$, 可得散射矩阵方程:

$$\begin{pmatrix} B_1 \\ B_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} B_0 [P - A_0] & 2B_0 \\ 2D_0 A_0 & D_0 [C_0 - I] \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} F_1 \\ F_2 \end{pmatrix} \quad (9)$$

假设一区中 TE 波的其中一个模式的传输系数 $\gamma \rightarrow 0$, 则该模式的 $Z_{i1} \rightarrow \infty$, 将突变结构两边的横向电磁场 E 和 H 展开, 对一区和二区分别有:

$$E_1 = \sum_{i=1}^M (F_{i1} + B_{i1}) e_{i1}, H_1 = \sum_{i=1}^M \left(\frac{F_{i1} - B_{i1}}{Z_{i1}} \right) h_{i1} \quad (10)$$

$$E_2 = \sum_{j=1}^N (F_{j2} + B_{j2}) e_{j2}, H_2 = \sum_{j=1}^N \left(\frac{B_{j2} - F_{j2}}{Z_{j2}} \right) h_{j2} \quad (11)$$

同样应用电场与磁场满足的连续性条件,有

$$Z_2 P Y_1 [F_1 - B_1] = I[B_2 - F_2]$$

$$I[F_1 + B_1] = R[F_2 + B_2] \quad (12)$$

令 $A_1 = Z_2 P Y_1$ 可得散射矩阵方程:

$$\begin{pmatrix} B_1 \\ B_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} B_0[A_1 - P] & 2B_0 \\ 2D_0A_1 & D_0[I - C_0] \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} F_1 \\ F_2 \end{pmatrix}. \quad (13)$$

对于二区中出现 $\gamma \rightarrow 0$ 的情况,可作同样处理.

对具有突变结构的谐振腔,其突变处的散射矩阵如下:

$$\text{对于左侧突变有:} \begin{pmatrix} B_1 \\ B_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} F_1 \\ F_3 \end{pmatrix}, \quad (14)$$

$$\text{对于右侧突变有:} \begin{pmatrix} B_4 \\ B_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_{21} & S_{22} \\ S_{11} & S_{12} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} F_4 \\ F_2 \end{pmatrix}. \quad (15)$$

对于中间过渡段有: $F_4 = DF_3, B_3 = DB_4$, (16)

其中, D 为以 $\exp(-\gamma l)$ 作对角线元素的对角线矩阵, l 为腔体的长度, γ 为腔体中各模式的传播常数,消去参数 F_3, F_4 与 B_3, B_4 , 整理得到由 S_1, S_2 和 D 级联生成的 S_0 矩阵

$$\begin{pmatrix} B_1 \\ B_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_{011} & S_{012} \\ S_{021} & S_{022} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} F_1 \\ F_2 \end{pmatrix}. \quad (17)$$

在计算多个突变结构时,利用上述公式将任意多级 S 参数矩阵及参数矩阵相互级联,计算出一个整体的 S 参数矩阵,最后由整体的 S 参数矩阵得到特征值方程,并通过求解特征值方程计算出谐振腔的谐振频率和品质因数,从而方便研究腔体整体性能.

2 数值计算与设计

在以上理论分析的基础上,编制计算程序,对回旋速调管的具有突变结构的各谐振腔进行数值计算分析.

2.1 输入谐振腔的设计

回旋速调管的输入腔可以看成在 TE₁₀[□]-TE_{n11}[○]-TE₀₁[○] 输入耦合器的内圆波导中增加一个圆柱谐振腔. 表 1 给出了 34 GHz, TE₀₁ 模输入谐振腔的设计参数.

表 1 输入谐振腔的设计参数

Table1 The designed parameters of input cavity

输入矩 波导/ mm	外腔 半径/ mm	外腔 长度/ mm	内腔 半径/ mm	内腔 长度/ mm	漂移段 半径/ mm	谐振 频率/ GHz	Q 值
3.556 × 6.6	9.20	6.60	5.56	12	3.98	34	170

根据表 1 给出了 34 GHz, TE₀₁ 模输入谐振腔的设计参数,利用 HFSS 软件建立三维模型对输入谐振腔进行仿真. 图 2 给出了 HFSS 仿真所得输入谐振腔的三维模型及场分布图. 由图 2 可以看出外同轴谐振腔中的 TE₄₁₁ 模通过四条耦合缝在输入谐振

腔内腔中激励起较纯的 TE₀₁₁ 模.

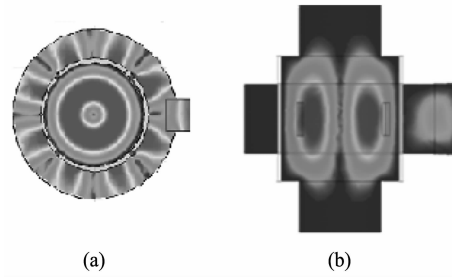


图 2 仿真所得输入谐振腔的三维模型及场分布
Fig.2 The 3D model and field distribution of input cavity

图 3 为该输入腔经仿真所得的传输参数,由图可以看出,该输入谐振腔的中心谐振频率为 34 GHz, Q 值为 170. 根据表 1 给出的设计参数,加工了一个样品,并对其进行了冷测实验.

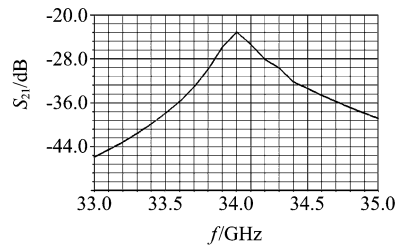


图 3 仿真所得 Ka 波段输入谐振腔的 S₂₁ 参数
Fig.3 The S₂₁ parameters for input cavity obtained by HFSS

图 4 为冷测所得输入腔的实验结果,由图 4 可以看出,该样品的中心谐振频率为 34.006 GHz, Q 值为 161. 与图 3 的 HFSS 仿真结果吻合较好.

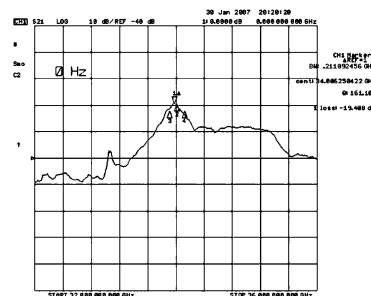


图 4 冷测实验所得输入谐振腔的 S₂₁ 参数
Fig.4 The S₂₁ parameters for input cavity obtained by cold test

2.2 群聚腔的设计

回旋速调管的群聚腔在仅有铜损的情况下,谐振腔的 Q 值很高,工作频带窄,易发生寄生模式振

荡. 因而针对工作模式及寄生模式特点, 通过在谐振腔加载损耗介质, 增加腔体的损耗, 可以降低群聚腔的 Q 值(腔体的 Q 值随加载损耗介质的厚度增加而降低, 通过调整损耗介质的厚度可以调整腔体的 Q 值, 改善工作模式的谐振特性, 增加带宽); 通过在群聚腔和漂移段中加载损耗介质层, 提高工作模式和寄生模式起振电流, 达到抑制寄生模式振荡, 提高工作模式稳定性的目的, 同时吸收在漂移段中的寄生模式 TE_{11} 模和 TE_{21} 模, 减小寄生模式对电子注群聚质量的影响, 进而达到提高整管性能的目的. 表 2 给出了一个 Ka 波段、 TE_{01} 模群聚腔的设计参数.

表 2 群聚腔的设计参数

Table 2 The designed parameters for bunching cavity

腔体半径 /mm	腔体长度 /mm	漂移段半径/mm	损耗层厚度/mm	损耗介质介电常数	损耗正切	谐振频率 /GHz	Q 值
6.345	8.2	4.175	0.25	10	0.4	33.9	120

根据表 2 给出的设计参数, 利用 HFSS 软件进行仿真验证. 图 5 为 TE_{01} 模群聚腔的场分布. 由图可知, 群聚腔中激励起较纯的 TE_{011} 的驻波场.

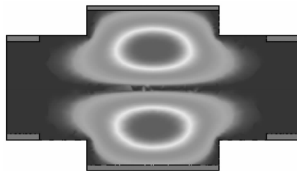


图 5 TE_{01} 模群聚腔的场分布

Fig. 5 The field distribution of TE_{01} mode in bunching cavity

根据表 2 给出的结构尺寸, 加工了一个样品, 并对其进行了测试. 图 6 为群聚腔样品的冷测结果图. 可见, 该样品的中心谐振频率为 33.88 GHz, Q 值为 130, 与表 2 中的设计值较为一致.

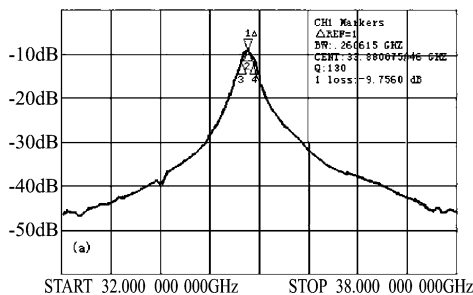


图 6 群聚腔的冷测结果

Fig. 6 The results of cold test for bunching cavity

2.3 输出腔的设计

回旋速调管的输出腔是由漂移段、谐振腔体、输

出耦合孔、输出段等组成. 其中输出耦合孔和漂移段对工作模式是截止的. 在数值计算分析的基础上, 表 3 给出了输出腔的设计参数, 再将这些结构尺寸参数代入 HFSS 软件中建立三维模型, 进行仿真优化. 图 7 为仿真所得输出腔的场分布, 由图可知, 输出腔中激励起较纯的 TE_{011} 模.

表 3 输出腔的设计参数

Table 3 The designed parameters of output cavity

腔体半径 /mm	腔体长 /mm	耦合段半径/mm	耦合段长度/mm	漂移段半径/mm	谐振频率 /GHz	Q 值
5.56	15.45	5.00	1.60	3.98	33.98	162

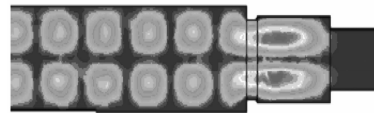


图 7 TE_{01} 模输出腔的场分布

Fig. 7 The field distribution of TE_{01} mode in output cavity

根据表 3 给出的设计方案, 加工制作一个样品, 并对其进行了测试. 图 8 为 HFSS 仿真所得的传输参数曲线. 图 9 为冷测结果图. 从图 8 和图 9 可知, 实验测得的谐振频率为 33.97 GHz, Q 值为 159.32; 计算得到的谐振频率为 33.98 GHz, Q 值为 162. 两者的谐振频率的偏差只有 10 MHz; Q 值的偏差也很小, 只有 2.68, 相对偏差为 1.65%. 可见, 冷测结果和 HFSS 仿真结果较吻合.

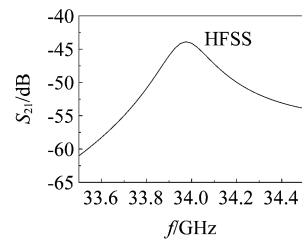


图 8 仿真所得的输出腔 S_{21} 参数

Fig. 8 The S_{21} parameters of output cavity obtained by HFSS

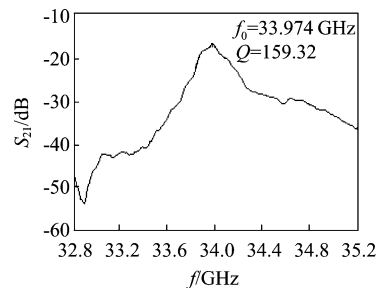


图 9 输出腔的冷测结果

Fig. 9 The results of cold test for the output cavity

3 PIC 模拟结果

在以上高频腔体系统的计算分析与设计的基础上,建立 PIC 粒子模型,对回旋速调管注-波相互作用进行了粒子模拟.研究了电子注参量、频率等对回旋速调管的输出功率、增益和效率等的影响.同时利用参差调制技术,进一步优化了各腔的谐振频率和 Q 值,获得了高功率、高效率、高增益和较宽频宽的 Ka 波段 TE₀₁ 模回旋速调管的设计方案.表 4 给出了回旋速调管高频腔体系统的优化设计参数,表 5 给出了回旋速调管的设计工作参数.

表 4 高频腔体优化设计参数

Table 4 The optimized parameters of high frequency cavities

	输入腔	第一群聚腔	第二群聚腔	输出腔
中心频率	34 GHz	33.9 GHz	33.6 GHz	33.98 GHz
Q 值	160	120	120	160

表 5 回旋速调管放大器的设计工作参数

Table 5 The designed working parameters of the gyroklystron

注电压/kV	70	中心频率/GHZ	34
注电流/A	11	驱动功率/W	20
纵横速度比/ α	1.5	工作磁场强度/T	1.31
引导中心半径/mm	2.55		

根据表 4、表 5 的设计参数,建立 PIC 粒子模拟模型,进行了注-波相互作用粒子模拟分析,以下是一些模拟结果:

由图 10 可见,粒子模拟模型都包括输入腔、2 个中间群聚腔,输出腔、收集极、3 个漂移段.粒子模拟中引入损耗介质将高频谐振腔的 Q 值降低.电子注在高频相互作用系统中完成回旋能量调制、角向群聚、强烈的注-波相互作用,交出能量输出高功率毫米波,完成使命的电子在外加磁场的引导下最后打到收集极上.由图 11 可以看出,输出腔激励起较纯的 TE₀₁ 模输出,比较输出腔与输入腔和群聚腔中的场幅值可知,输出腔中的场幅值远高于输入腔和群聚腔中的场幅值.

图 12 为回旋速调管的输入与输出频谱.由图可以看出,输入和输出频谱都较纯,且 Ka 波段的输入和输出频率都为 34 GHz;从而保证了回旋速调管的稳定工作.

由图 13 可知,回旋速调管的输出功率在 7 ~ 8 ns 时就基本达到了稳定状态,得到了 390 kW 的稳定输出.图 14 为注电压 70 kV,注电流 11 A,速度比

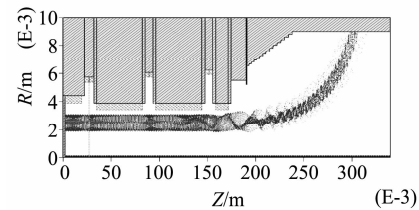


图 10 粒子模拟模型及电子注轨迹
Fig. 10 The PIC model and track of electron beam

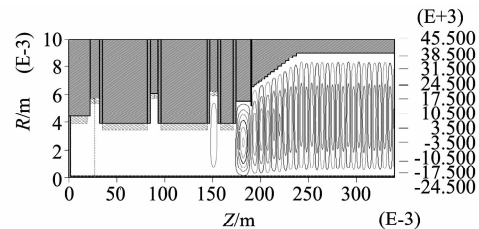


图 11 回旋速调管中的高频电场分布
Fig. 11 The distribution of high frequency electric field

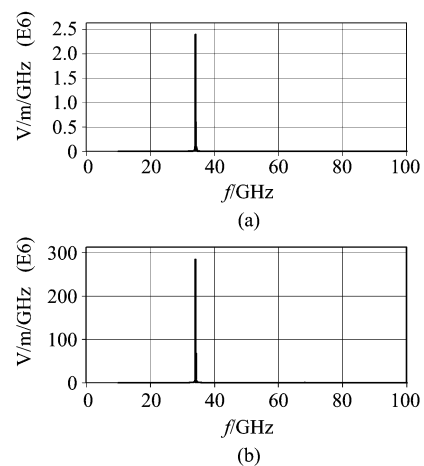


图 12 回旋速调管输入(a)与输出(b)频谱
Fig. 12 The input frequency spectrum (a) and output frequency spectrum(b) of the gyro-klystron amplifier

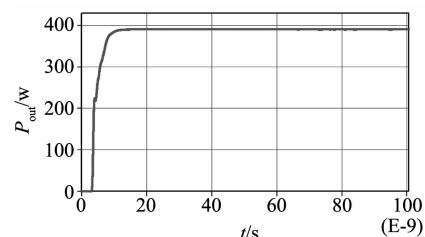


图 13 输出功率与时间的关系
Fig. 13 Relation between the output power and time

1.5,磁场强度 1.31 T 的情况下模拟所得输出功率与频率关系图.由图 14 可知,模拟所得最高输出功

率为 390 kW,最大饱和增益 42.9 dB,最高电子效率 50.6% (中心频率 34 GHz 处),3 dB 带宽 360 MHz.

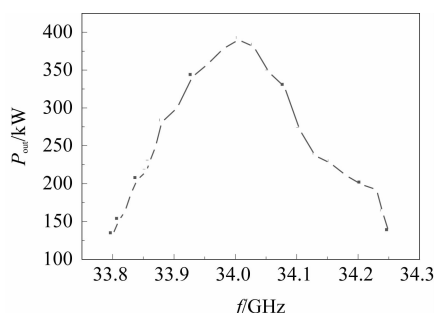


图 14 输出功率与频率关系

Fig. 14 Relation between the output power and frequency

4 热测实验

在高频腔体设计和粒子模拟的基础上,根据表 4、表 5 的设计方案,研制了一支样管,并对其进行了热测实验.经热测,在注电压为 70 kV、电流为 11 A、第一阳极电压 28 kV、输入功率为 20 W、磁场强度 1.31 T、中心频率 34 GHz 的条件下得到以下实验结果:峰值功率 301 kW、效率 39.1%、增益 41.8 dB、3 dB 带宽 285 MHz.通过实验结果与模拟结果比较可以看出,实验所测得输出最大功率要比模拟结果小约 90 kW,3 dB 带宽小约 75 MHz.主要原因归结如下:

(1)模拟时采用的是理想电子注,没有考虑电子注的速度零散.在实际制管过程中,由于阴极表面发射材料涂敷的不均匀性,阴极表面的高温,电子枪装配的误差等因素造成电子注的速度零散.电子注的速度零散会引起输出功率的减小和输出带宽的变窄.

(2)样管零部件的加工装配误差,造成高频系统的谐振频率、Q 值以及各漂移段的长度与设计值有一定的偏差,进而影响样管的性能.

(3)热测实验时,样管安装在磁体中存在一定的偏心,纵向的位置也存在一定的偏差,造成高频系统以及电子枪与工作磁场的匹配并非最佳.这会影响到电子注的横纵速度比以及输出腔中电子注的群聚状态,进而影响样管的性能.

(4)热测实验采用的大功率计的水负载与样管的输出端并非完全匹配,存在一定的反射.反射回的能量会影响输出腔中电子注的群聚状态,造成样管的输出功率和带宽减小.

下面是一些实验图片和实验结果.

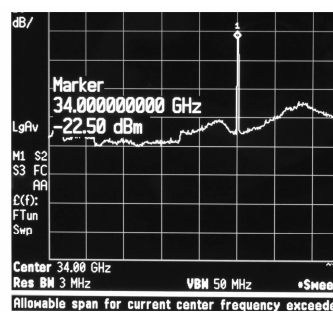


图 15 回旋速调管输出频谱

Fig. 15 The output frequency spectrum of gyrotron

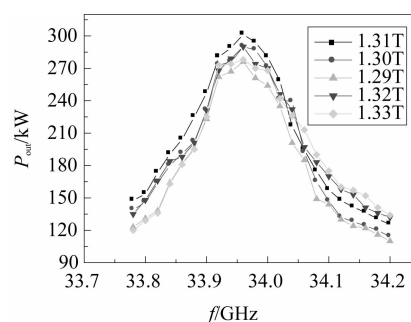


图 16 在不同磁场强度下实测的输出功率与频率的关系

Fig. 16 Relation between the tested output power and frequency under different magnetic fields

图 15 为回旋速调管输出频谱照片.由图 15 可知该回旋速调管输出频谱较纯.图 16 为在注电压 70 kV,电流 11 A,不同工作磁场下实测的输出功率与频率的关系图,由图可知,在工作磁场为 1.31 T (特斯拉)时,最大输出功率为 301 kW(34 GHz 处);3 dB 带宽为 285 MHz,增益 41.8 dB,效率为 39.1%,此磁场下,测得的输出功率最高,视为最佳工作磁场;在工作磁场为 1.3 T (特斯拉)时,最大输出功率为 290 kW;3 dB 带宽为 270 MHz.在磁场强度为 1.29 T 时,最大输出功率为 276 kW;3 dB 带宽为 220 MHz.在工作磁场为 1.32 T 时,最大输出功率为 290 kW;3 dB 带宽为 340 MHz.在工作磁场为 1.33 T 时,最大输出功率为 278 kW;3 dB 带宽为 320 MHz.可见,当工作磁场与最佳值相比偏小时,回旋速调管的最大输出功率会减小,同时 3 dB 带宽也变小.当工作磁场与最佳值相比偏大时,回旋速调管的最大输出功率会减小,但 3 dB 带宽有所增加.热测时,在没有大幅度影响输出功率的情况下,可以

适当增大外部磁场强度来增加 3 dB 带宽。

5 结论

利用场匹配理论,建立了具有突变结构谐振腔的级联散射矩阵.通过数值计算与分析完成了输入谐振腔、群聚腔、输出腔的设计.同时,给出了一支 Ka 波段 TE₀₁ 模基波回旋速调管高频系统的设计参数. PIC 模拟表明:在优化设计条件下该回旋速调管可以获得 390 kW 的稳定输出、42.9 dB 的增益、50.6% 的效率、360 MHz 的 3 dB 输出带宽.通过验证样管的热测实验表明:在注电压为 70 kV、电流为 11 A、输入功率为 20 W、磁场强度 1.31 T、中心频率 34 GHz 的条件下得到峰值功率 301 kW、效率 39.1%、增益 41.8 dB、3 dB 带宽 285 MHz 的实验结果.

REFERENCES

[1] Zasyupkin E V, Moiseev M A., Sokolov E V, *et al.* Effect of penultimate cavity position and tuning on three-cavity gyrokystron amplifier performance [J]. *Int. J. Electronics*, 1995, **78**(2): 423 - 433.

[2] Danly B G, Blank M, Calame J P, *et al.* Development and testing of a high average power 94GHz gyrokystron [J]. *IEEE Trans. Plasma Sci.*, 2000, **28**(3): 713 - 724.

[3] XU Shou-Xi, LIU Pu-Kun. Simulation and design of a novel chain bunching cavity for gyrokystron amplifier [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves* (徐寿喜, 刘濮鲲. 新型回旋速调管放大器链式群聚腔的模拟与设计. *红外与毫米波学报*), 2003, **22**(6): 431 - 435.

[4] WANG Jian-Xun, LUO Yong, XU Yong, *et al.* Study on high frequency circuit of a high-power Ka-band gyrokystron [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves* (王建勋, 罗勇, 徐勇, 等. Ka 波段高功率基波回旋速调管高频系统研究. *红外与毫米波学报*), 2008, **27**(4): 290 - 294.

[5] XU Yong, LUO Yong, XIONG Cai-Dong, *et al.* Design and experiment of a K α -band TE₍₀₁₎ mode fundamental wave gyrokystron amplifier [J]. *Acta Physica Sinica* (徐勇, 罗勇, 熊彩东, 等. Ka 波段 TE₀₁ 模基波回旋速调放大器的设计与实验. *物理学报*), 2011, **60**(4): 048403-1-048403-8.

[6] Xu Y, Luo Y, Xiong C D, *et al.* Experimental study of a wide-band Ka-band gyrotwystron amplifier [C]. *Proceedings of the China-UK/Europe workshop on millimeter waves and terahertz technology*, 2008: 102-104.

[7] Blank M, Danly B G, Levush B, *et al.* Experiment demonstration of W-band gyrokystron amplifiers with improved gain and efficiency [J]. *IEEE Trans. Plasma Sci.*, 2000, **28**(3): 706 - 712.

(上接 530 页)

消逝波相匹配,从而导致缺陷 Tamm 态色散曲线发生移动.虽然无缺陷 Tamm 态电磁波局域在光子晶体表面,但由于消逝的布洛赫波在光子晶体内部有一定的传播距离,其群速度仍然受到周期结构的调制,因此具有一定的色散.缺陷 Tamm 态比无缺陷 Tamm 态具有更强的电磁波局域性,尤其是当 n_D 较大时,电磁波能量大部分集中在缺陷层内,因此其群速度受到周期结构的影响较小,大小近似等于光在单层介质中的传播速度.

3 结论

把一维光子晶体表面缺陷和表面模式相结合,系统研究了半无限一维光子晶体缺陷 Tamm 态的存在条件、模式特征,并与半无限一维光子晶体无缺陷 Tamm 态进行了比较.对 TE 波,缺陷 Tamm 态的频率范围向高低两个方向扩大;而对 TM 波,缺陷 Tamm 态的频率范围只向高频扩大,而低频范围减小.缺陷层的引入增大了调节 Tamm 态的频率范围,将为实际应用提供参考.

REFERENCES

[1] Yeh P. *Optical waves in layered media* [M]. John Wiley &

Sons, New York, 1998: 104.

[2] Vinogradov A P, Dorofeenko A V, Erokhin S G, *et al.* Surface state peculiarities in one-dimensional photonic crystal interfaces [J]. *Phys. Rev. B*, 2006, **74**(4): 045128.

[3] Brand S, Kaliteevski M A, Abram R A. Optical Tamm states above the bulk plasma frequency at a Bragg stack/metal interface [J]. *Phys. Rev. B*, 2009, **79**(8): 085416.

[4] Namdar A. Tamm states in one-dimensional photonic crystals containing left-handed materials [J]. *Optics Communications*, 2007, **278**(1): 194 - 198.

[5] Kavokin A V, Shelykh I A, Malpuech G. Lossless interface modes at the boundary between two periodic dielectric structures [J]. *Phys. Rev. B*, 2005, **72**(23): 233102.

[6] Villa F, Regalado L E, Ramos-Mendieta F, *et al.* Photonic crystal sensor based on surface waves for thin-film characterization [J]. *Opt. Lett.* 2002, **27**(8): 646 - 648.

[7] Kaliteevski M, Iorsh I, Brand S, *et al.* Tamm plasmon-polaritons: Possible electromagnetic states at the interface of a metal and a dielectric Bragg mirror [J]. *Phys. Rev. B*, 2007, **76**(16): 165415.

[8] Feng S, Sang H Y, Li Z Y, *et al.* Sensitivity of surface states to the stack sequence of one-dimensional photonic crystals [J]. *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.* 2005, **7**(8): 374 - 381.

[9] FANG Yun-Tuan, SHEN Ting-Gen, TAN Xi-Lin. Study on one-dimensional photonic crystal with impurity defects [J]. *Acta Optica Sinica* (方云团, 沈廷根, 谭锡林. 一维光子晶体掺杂缺陷模研究. *光学学报*), 2004, **24**(11): 1557 - 1560.