

X 波段过模弯曲圆波导 TM_{01} - HE_{11} 模式变换器研究*

徐刚† 谢平 廖勇

(中国工程物理研究院应用电子学研究所, 高功率微波技术重点实验室, 绵阳 621900)

(2012 年 9 月 5 日收到; 2012 年 11 月 21 日收到修改稿)

在波束波导和反射面天线的馈源应用中, 为了产生低副瓣且方向图等化的高斯波束, 需要将高功率微波转换为准高斯模 HE_{11} 模辐射. 本文利用弯曲圆波导可同时从 TM_{01} 模产生 TE_{11} 模和 TM_{11} 模的原理, 提出了采用双弯曲过模圆波导结构直接将 TM_{01} 转换为 HE_{11} 的模式变换器, 避免了常规微波领域中首先将 TM_{01} 转换为 TE_{11} 再用波纹式或半径渐变式 TE_{11} - HE_{11} 转换器转换为准高斯波束功率容量不足或尺寸过长的不足. 基于模式耦合理论和 Taguchi 优化算法对模式变换器的弯曲半径、相移直端长度及引入位置进行了优化, 使输出的 TE_{11} 和 TM_{11} 成一定比率, 以组成 HE_{11} 模式, 并对设计的模式变换器进行了全电磁波仿真分析, 结果表明输出波束的标量高斯含量在 9.05—9.8 GHz 范围内均高于 99%, 理论功率容量可达 4.5 GW.

关键词: 高功率微波, 模式耦合理论, Taguchi 优化算法, 模式变换器

PACS: 84.40.Az, 84.40.Ba, 84.40.-x

DOI: 10.7498/aps.62.078401

1 引言

为获得较高的功率容量, X 波段高功率微波 (high power microwave, HPM) 主要以过模圆波导 TM_{01} 模式输出^[1-5], 并通过 TM_{01} - TE_{11} 模式变换器转换为 TE_{11} 模, 实现 HPM 的定向辐射^[6-10]. 在许多应用中, 如低损耗波纹波导、波束波导辐射器和反射面天线馈源中, 为了提高辐射效率及降低副瓣, 要求辐射出的波束尽量接近高斯波束, 因此常常需要将 TE_{11} 模进一步转换为准高斯的 HE_{11} 模式.

在低功率及大功率微波领域, 通常采用表面阻抗渐变的波纹 TE_{11} - HE_{11} 模式变换器^[11-13], 该模式变换器虽然结构紧凑, 但由于高功率工作条件下波纹波导齿间的击穿问题难以解决, 使得波纹式 TE_{11} - HE_{11} 模式变换器在 HPM 领域没有得到应用. 文献 [16] 中研究了一种适合高功率容量工作的光滑壁圆波导 TE_{11} - HE_{11} 模式变换器, 然而仅 TE_{11} - HE_{11} 模式变换器长度就达到 700 mm, 加上 TM_{01} - TE_{11} 模式变换器, 长度将超过 1.5 m, 不利

于馈线系统的紧凑性. 本文基于 HE_{11} 模式主要由 TE_{11} 和 TM_{11} 两个模式组成, 而弯曲圆波导在将 TM_{01} 转换为 TE_{11} 模式的同时, 也可产生 TM_{11} 模式的原理, 研究了利用双弯曲过模圆波导实现将 TM_{01} 模式直接转换为 HE_{11} 的技术, 通过 Taguchi 优化算法优化了变换器的几何参数, 使输出模式为 80% TE_{11} 模和 20% TM_{11} 模的组合, 且相位一致时, 即可产生较为理想的准高斯 HE_{11} 模.

2 HE_{11} 模的组成及模式耦合理论2.1 过模弯曲圆波导产生 HE_{11} 模式

HE_{11} 模是波纹圆波导内的基模, 由于其幅值分布与高斯分布非常接近, 且交叉极化和传输损耗都很低, 是高斯波束波导、低损耗波纹波导和高性能馈源的理想激励模式, 在光滑壁圆波导内, 它可由一系列的特征模式组成, 其中最主要两个模式为 TE_{11} 和 TM_{11} 模.

利用弯曲圆波导可将 TM_{01} 模式转换为 TE_{11} 模式, 若波导为高过模时, 则在其中也会产生 TM_{11} 模式, 因此我们考虑是否可以通过设计合理的几何

* 国家高技术研究发展计划、中国工程物理研究院科学技术发展基金 (批准号: 2012B0402067) 资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: xugangthu@163.com

参数, 使过模弯曲圆波导产生需要组分的 TE_{11} 模和 TM_{11} 模. 弯曲圆波导模式变换器的结构和几何参数如图 1 所示, 它由两段弯曲方向不同的圆波导组成, 弯曲半径分别 R_1 和 R_2 , 转角均为 θ , 以保证输入输出端口轴线平行, 两端弯曲波导中间各引入一段长度为 d_1 和 d_2 的直端, 以实现模式间相位的重匹配, 引入位置分别为 θ_{c1} 和 θ_{c2} , 如何选取这 7 个几何参数的数值, 达到期望的输出模式组分, 就成为了一个多参数的全局最优化问题.

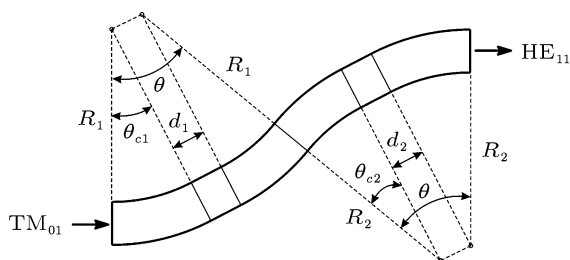


图 1 模式变换器结构和几何参数示意图

2.2 弯曲圆波导模式耦合理论

圆波导中因轴线弯曲产生的模式间相互转换可用模式耦合理论来分析, 各模式之间的相互转换关系可用耦合波方程表示为^[13,15]

$$\begin{aligned} \frac{dA_{m'n}^{\pm}}{dz} = & -\frac{1}{2} \frac{d(\ln \gamma_{m'n})}{dz} A_{m'n}^{\mp} \mp \gamma_{m'n} A_{m'n}^{\pm} \\ & + \sum_{+mn} C_{(m'n)(mn)}^{\pm} A_{mn}^{+} \\ & + \sum_{-mn} C_{(m'n)(mn)}^{\mp} A_{mn}^{-}, \end{aligned} \quad (1)$$

式中, A_{mn}^{+} , A_{mn}^{-} 表示正向与反向传播的 (mn) 模式的幅值; $\gamma_{mn} = \alpha_{mn} + j\beta_{mn}$ 为 (mn) 模式的传播常数, 其中 α_{mn} 为衰减常数, 取决于波导壁的欧姆损耗; β_{mn} 为相位常数; $C_{(m'n)(mn)}^{+}$, $C_{(m'n)(mn)}^{-}$ 表示 (mn) 模式与同向及反向 $(m'n)$ 模式的耦合系数 ($m' = m+1$), 表达式见下式^[13-15]:

$TE_{mn} \rightarrow TE_{m'n} :$

$$C_{(m'n)(mn)}^{\pm} = \frac{(-1)^{n+n'} \left\{ (1 \pm R_{mn} R_{m'n}) [2X_{mn}^2 X_{m'n}^2 - mm' (X_{mn}^2 + X_{m'n}^2)] - \frac{X_{mn}^2 X_{m'n}^2 (X_{mn}^2 + X_{m'n}^2 - 2mm')}{(ka)^2} \right\} ka}{2\sqrt{(R_{mn} R_{m'n}) (X_{mn}^2 - m^2) (X_{m'n}^2 - m'^2) (X_{m'n}^2 - X_{mn}^2)^2} R},$$

$$TE_{mn} \rightarrow TM_{m'n} : C_{(m'n)(mn)}^{\pm} = \frac{-m(R_{mn} \pm R_{m'n}) (-1)^{n+n'+1} ka}{2\sqrt{R_{mn} R_{m'n} (X_{mn}^2 - m^2) (X_{m'n}^2 - X_{mn}^2)} R},$$

$$TM_{mn} \rightarrow TE_{m'n} : C_{(m'n)(mn)}^{\pm} = \frac{m'(R_{mn} \pm R_{m'n}) (-1)^{n+n'+1} ka}{\sqrt{R_{mn} R_{m'n} (X_{m'n}^2 - m'^2) (X_{m'n}^2 - X_{mn}^2)} R} \times \begin{cases} 1/\sqrt{2} & (m=0), \\ 1/\sqrt{2} & (m \geq 1), \end{cases}$$

$$TM_{mn} \rightarrow TM_{m'n} : C_{(m'n)(mn)}^{\pm} = \frac{(-1)^{n+n'} (R_{mn} \pm R_{m'n}) (R_{mn} X_{m'n}^2 \pm R_{m'n} X_{mn}^2) ka}{2\sqrt{R_{mn} R_{m'n} (X_{m'n}^2 - X_{mn}^2)^2} R} \times \begin{cases} 1/\sqrt{2}, & (m=0), \\ 1/2, & (m \geq 1), \end{cases}$$

其中, R 为该位置的曲率半径, $R_{mn} = \beta_{mn}/k_0$, X_{mn} 为第 m 阶 Bessel 函数 $J_m(x)$ (对于 TM 模) 或者其导数 $J'_m(x)$ (对于 TE 模) 的第 n 个非零根.

3 基于 Taguchi 算法的全局优化设计

3.1 Taguchi 优化算法^[18,19]

Taguchi 优化算法一种基于正交实验表的迭代优化算法, 该算法将每个参数按其取值范围等分为 3 个级阶, 按照正交表中的所有参数级阶组合进行

计算, 并对得到的适应度值进行统计分析, 找出该次迭代中的各参数的最优级阶, 在下次迭代中减小各参数的级阶差, 以目前得到的最优级阶为中值生成级阶表, 再按正交表计算适应度值, 如此一直迭代, 直至级阶差或适应度值满足工程需要.

3.2 9.4 GHz TM_{01} - HE_{11} 模式转换器

为了将 $\Phi 70$ mm 过模圆波导内的 9.4 GHz TM_{01} 模高功率微波直接转换为准高斯的 HE_{11} 模式, 采用上述迭代优化方法对图 1 中模式变换

器的几何参数进行了全局优化设计, 其中适应度函数为输出端口的模式含量 $A_i(L)$ 与期望含量 A_i^{target} 的方差, 如 (2) 式, 利用“龙格 - 库塔”法数值求解模式耦合方程组 (1), 得到弯曲圆波导内的模式分

布. 各几何参数的搜索范围和优化得到的最佳值列于表 1 中.

$$\text{fitness} = \sum_{i=1}^n [A_i(L) - A_i^{\text{target}}]^2. \tag{2}$$

表 1 弯曲圆波导几何参数优化值

几何参数	R_1/mm	R_2/mm	d_1/mm	d_2/mm	$\theta R_1/\text{mm}$	θ_{c1}/θ	θ_{c2}/θ
搜索参数域	[700, 900]	[700, 900]	[50, 200]	[50, 200]	[220, 450]	[0.1, 0.8]	[0.1, 0.8]
优化最佳值	762.54	773.90	106.63	98.27	315.36	0.2232	0.2714

图 2 为优化过程中的收敛曲线. 图 3 为优化得到的 TM_{01} - HE_{11} 模式变换器沿轴线的模式含量分布, 可以看到, 优化结构使馈入的 TM_{01} 模式几乎完全的转换为 80% 的 TE_{11} 模和 20% TM_{11} 模, 其他高阶模式得到了很好抑制, 含量均低于 0.5%.

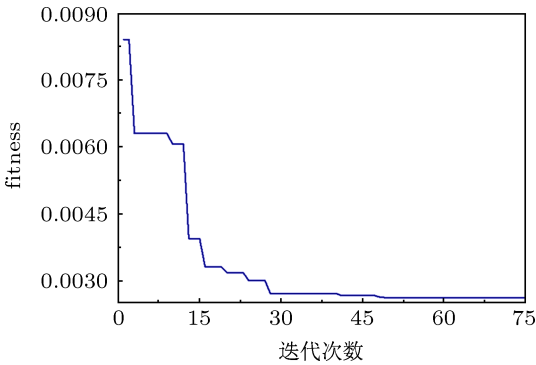


图 2 Taguchi 算法优化设计收敛曲线

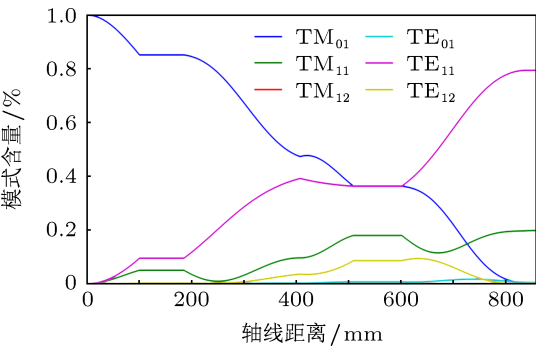


图 3 轴向沿线的模式含量分布

4 全电磁波模拟分析

对优化得到的结构进行建模, 进行全电磁波模拟分析, 结构模型如图 4 所示, 管壁厚度为 5 mm, 输入端为 TM_{01} 模.

图 5 为馈入平均功率为 0.5 W、频率为 9.4 GHz 时的剖面瞬态电场分布, 输入端的 TM_{01} 模在弯曲圆波导作用下逐渐转换为 HE_{11} 模, 其中最大电场强度为 631 V/m, 按真空中的射频击穿阈值 60 kV/mm 估算, 预计功率容量可达到 4.5 GW; 图 6(a) 为输出端口的电场矢量分布, 电场基本为 y 极化, 交叉极化很低, 图 7(b) 为对于的电场幅值分布, 呈比较理想的准高斯分布, 图 7(c) 为电场相位分布, 除边缘幅值较低区域外, 相位一致性很好. 由 (4) 式^[20] 可计算得到输出端口的标量高斯含量在 9.05—9.8 GHz 频率范围内均高于 99%、带宽为 7.9%, 如图 7 所示.

$$\eta_{\text{Gaussian}} = \frac{\left| \int_S |u_1| \cdot |u_2| \text{d}S \right|^2}{\int_S |u_1|^2 \text{d}S \cdot \int_S |u_2|^2 \text{d}S}, \tag{3}$$

式中, u_1 为观测面实际电场分布, u_2 为理想高斯分布, S 为观测平面.

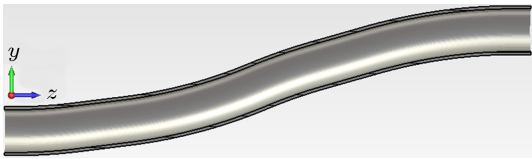


图 4 模式转换器仿真结构图

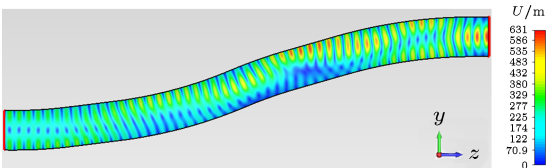


图 5 侧剖面瞬态电场分布

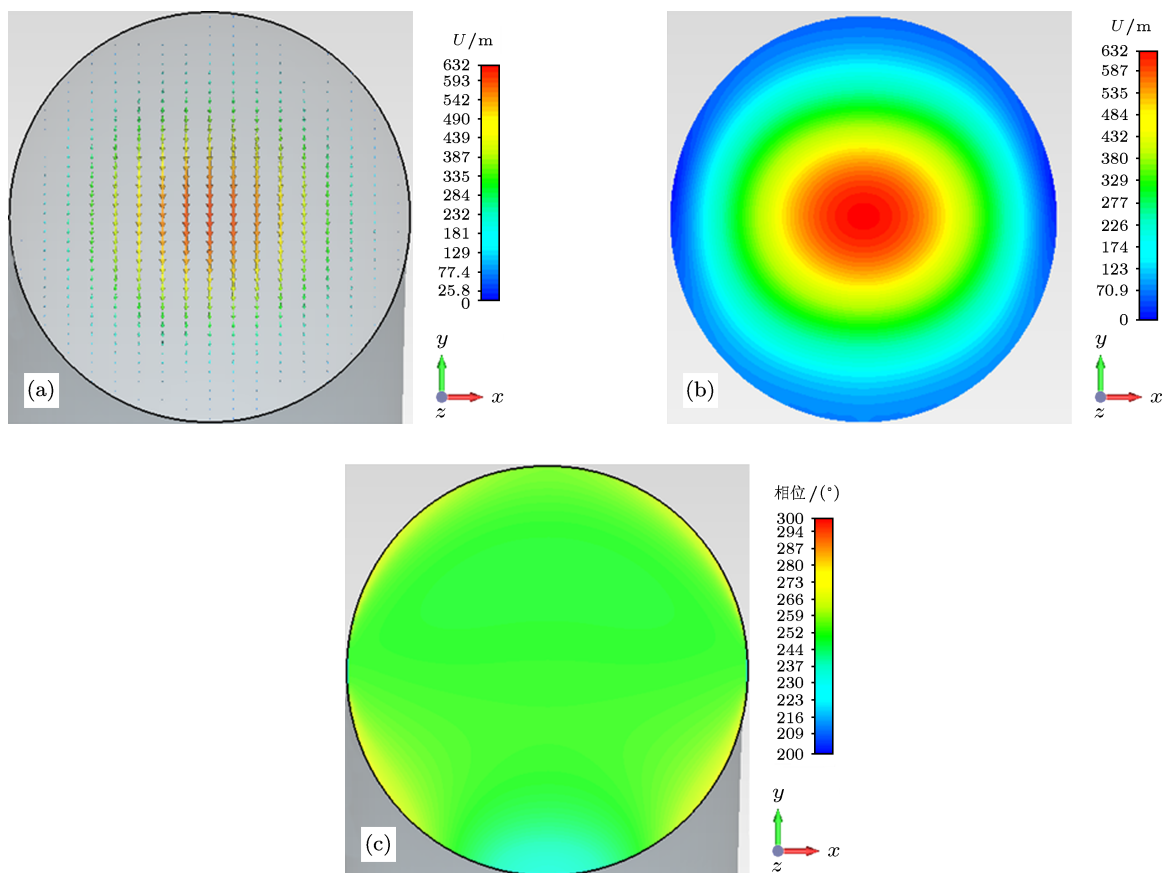


图6 9.4 GHz 输出端口电场分布 (a) 电场矢量; (b) 电场幅值; (c) 电场相位

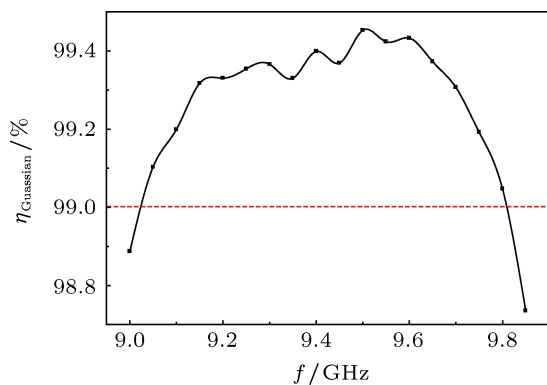


图7 不同频率的高斯转换效率

5 结论

利用 TM_{01} 模在过模弯曲圆波导能同时产生 TE_{11} 和 TM_{11} 模式的原理, 研究了直接将 TM_{01} 模转换为 HE_{11} 模的模式变换器技术. 通过在双弯曲圆波导中引入相位重匹配段和多个可调几何参数, 并利用 Taguchi 算法优化设计了 9.4 GHz 的 TM_{01} - HE_{11} 模式变换器. 模式耦合理论分析结果表明, 变换器可将馈入的 TM_{01} 模式转换为输出端 80% TE_{11} 模式和 20% TM_{11} 模式的组合, 并进行了全电磁仿真分析, 输出端电场为交叉极化很低的高斯分布, 高斯含量高于 99% 的带宽达到 7.9%.

- [1] Thumm M, Jacobs A, Sorolla A M 1991 *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques* **39** 301
- [2] Wu Y, Jin X, Ma Q S, Li Z H, Ju B Q, Su C, Xu Z, Tang C X 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 084101 (in Chinese) [吴洋, 金晓, 马乔生, 李正红, 鞠炳全, 苏昶, 许州, 唐传祥 2011 物理学报 **60** 084101]
- [3] Ma Q S, Jin X, Xu M, Li Z H, Wu Y 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 105201

- (in Chinese) [马乔生, 金晓, 绪明, 李正红, 吴洋 2011 物理学报 **60** 105201]
- [4] Liu Z B, Jin X, Xu M, Huang H, Chen H B 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 128401 (in Chinese) [刘振帮, 金晓, 黄华, 陈怀璧 2012 物理学报 **61** 128401]
- [5] Fang J Y, Huang H J, Zhang Z Q, Huang W H, Jiang W H 2011 *Acta*

- Phys. Sin.* **60** 048404 (in Chinese) [方进勇, 黄惠军, 张治强, 黄文华, 江伟华 2011 物理学报 **60** 048404]
- [6] Zhang Q, Yuan C W, Liu L 2008 **20** 1173 (in Chinese) [张强, 袁成卫, 刘列 2008 强激光与粒子束 **20** 1173]
- [7] Lan F, Yang Z Q, Shi Z J 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 155201 (in Chinese) [兰峰, 杨梓强, 史宗君 2012 物理学报 **61** 155201]
- [8] Wang X J, Liu F K, Zhao L M, Jia H, Liu H B, Kuang G L 2009 *Chin. Phys. Lett.* **26** 025202
- [9] Zhang Q, Yuan C W, Liu L 2011 *Chin. Phys. Lett.* **28** 068401
- [10] Yang S W, Qing A Y 2005 *IEEE Trans on Plasma Science* **33** 1372
- [11] Niu X J, Gu L, Yu X H 2011 *Acta Electronica Sinica* **39** 1947 (in Chinese) [牛新建, 顾玲, 于新华 2011 电子学报 **39** 1947]
- [12] Thumm M, Jacobs A, Ayza S 1999 *IEEE Trans on Microwave Theory and Techniques* **39** 301
- [13] Zhang Y W 2004 *Master Dissertation* (Changsha: National University of Defense Technology) (in Chinese) [张玉文 2004 硕士学位论文 (长沙: 国防科技大学)]
- [14] Wang D, Chen D B, Qin F, Fan Z K 2009 *Chin. Phys. B* **18** 04281
- [15] Xu A, Wang W X, Wei Y Y, Gong Y B 2009 *Chin. Phys. B* **18** 00810
- [16] Xu G, Yu C, Li Z H, Liao Y, Xie P 2013 *High Power Laser and Particle Beams* **25** 394 (in Chinese) [徐刚, 余川, 李正红, 廖勇, 谢平 2013 强激光与粒子束 **25** 394]
- [17] Yu X H 2010 *Ph. D. Dissertation* (Chendu: University of Electronic Science and Technology of China) (in Chinese) [于新华 2010 博士学位论文 (成都: 电子科技大学)]
- [18] Weng W C, Yang F, Demir V 2006 *IEEE Ant and Prop Society International Symposium* 2006 p2063
- [19] Xu G, Liao Y, Xie P, Meng F B, Tang C X 2011 *IEEE Transactions on Plasma Science* **39** 652
- [20] Shapiro M A, Temkin R J 2011 *Journal of Infrared Milli Terahz Waves* **32** 283

Investigation of an X-band over-moded bent circular waveguide TM_{01} - HE_{11} mode converter*

Xu Gang[†] Xie Ping Liao Yong

(Science and Technology on High Power Microwave Laboratory, Institute of Applied Electronics CAEP, Mianyang 621900, China)

(Received 5 September 2012; revised manuscript received 21 November 2012)

Abstract

In the application of low loss beam waveguides and high performance reflector antennas, high power microwave should be converted to quasi-Gaussian HE_{11} mode, to decrease side lobe level and increase feed coefficient. Based on the fact that TM_{01} mode converts to TE_{11} and TM_{11} mode at the same time in bent overmode circular waveguide, a TM_{01} to HE_{11} mode converter was proposed in this paper, which can convert TM_{01} mode to HE_{11} mode directly using a bent circular waveguide, the converter has higher power compacity than corrugated TE_{11} - HE_{11} mode converter and more compact than TE_{11} - TM_{01} mode converter added with smooth wall TE_{11} - HE_{11} mode converter. The geometric parameters of the convertor were analyzed and optimized by using coupled mode theory and Taguchi method, to output the target modes content, 80% TE_{11} and 20% TM_{11} modes, which are primarily composed of HE_{11} mode. The optimized converter was analyzed using full electro-magnetic simulation method, the scalar Gauss ratio of the output beam is higher than 99% from 9.05 GHz to 9.8 GHz, the power capacity is as high as 4.5 GW.

Keywords: high power microwave, coupled mode theory, Taguchi optimization method, mode converter

PACS: 84.40.Az, 84.40.Ba, 84.40.—x

DOI: 10.7498/aps.62.078401

* Project supported by the National High Technology Development Programe of China and the Science and Technology Development Foundation of CAEP (Grant No. 2012B0402067).

[†] Corresponding author. E-mail: xugangthu@163.com