

高阶圆波导模式圆极化器的研究

吴泽威, 李浩, 付华, 徐建华, 李家胤

(电子科技大学 物理电子学院, 四川 成都 610054)

摘要:提出了一种基于光滑圆波导结构的高阶 TE_{mn} 模圆极化器. 运用耦合波理论和数值计算方法对 93 GHz $TE_{5,1}$ 模圆极化器进行了研究和设计. 设计的圆极化器由过渡段和移相段组成, 结构简单, 易于实现. 在 88 ~ 98 GHz 的频带内, 最大轴比低于 1.18. 空间辐射测试结果证明了这种高阶圆极化器的性能. 为高性能的低阶波导模式圆极化器的设计提供重要参考.

关键词:高功率微波; TE_{mn} 模; 圆波导; 圆极化器

中图分类号:TN1 **文献标识码:**A

Circular polarizers for high-order waveguide modes

WU Ze-Wei, LI Hao, FU Hua, XU Jian-Hua, LI Jia-Yin

(School of Physical Electronics, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

Abstract: Based on the smooth cylindrical waveguide structure, an novel polarization converter for high-order TE_{mn} mode is presented. Using the general coupled wave theory and numerical optimization method, a polarization converter for 94 GHz $TE_{5,1}$ mode is studied. The proposed polarizer, consisting of transition section and phase shift section, features structurally simple and easy construction. From 88 GHz to 98 GHz, the maximum axial ratio of the polarizer is less than 1.18. The performance of polarizer was verified by comparing the ideal radiation field and the measured one. The research work provides a physics model for designing low-order waveguide mode polarizer with high conversion efficiency.

Key words: high-power microwave, TE_{mn} mode, cylindrical waveguide, polarizer

PACS: 41.20.Jb, 07.57.Kq, 84.40.Az

引言

高功率回旋管在受控热核聚变的等离子体加热、高能粒子加速器、毫米波定向能武器、材料处理及等离子体化学等领域有着广泛应用^[1-3]. 在回旋管相互作用腔结构、输出模式变换器、输出窗等关键部件的研究中, 为了指导这些器件的安装或者测试其性能, 有必要对圆极化的 TE_{mn} 模式发生器进行研究^[4-6]. 国外有多个研究小组专门研究这种用于测量的 TE_{mn} 模式圆极化发生器, 国内在这方面的研究文献报道较少.

高阶 TE_{mn} 模式圆极化发生器产生方法主要有准光学激励、波导腔体激励等方法. 采用准光学激励的办法可以直接输出圆极化波, 而波导腔体激励的方式只能先输出线极化波, 然后通过圆极化器实现

圆极化波. 由于准光学激励的方法效率较低, 结构复杂, 对加工和安装工艺要求很高, 当前主要用于阶数极高的模式如 $TE_{15,4}$ 、 $TE_{22,6}$ 模等的激励^[4-5,7]. 基于普通圆波导腔的 Y 型功分结构和基于同轴波导腔的单边激励等方式可以产生高纯度的线极化高阶模式^[8-10]. 这些基于波导腔体激励的模式发生器结构简单, 易于实现. 若能改变产生的高阶模式的极化方式, 则对于圆极化的 TE_{mn} 模式发生器的研究与应用具有重要的意义. 本文通过研究圆波导中高阶 TE_{mn} 模式的传输特点, 引入微扰形变的波导结构, 实现了高阶模式的极化转换. 文章首先给出了波导圆极化器的设计原理, 并利用耦合波理论对提出的圆极化器进行了分析. 然后, 基于提出的方法编写数值程序, 设计了一个中心频率为 93 GHz、 $TE_{5,1}$ 模式圆极化器, 并利用电磁仿真软件对设计的圆极化器的

性能进行了验证. 最后, 对设计的模式圆极化器进行了加工, 测试, 并讨论了相关结果.

1 光滑波导圆极化器设计的基本原理

任何两个同频率、同传播方向且极化方向垂直的线极化波, 当它们的振幅相等但相位差 $\pm \pi/2$ 时, 其合成波为圆极化波^[11]. 因此, 在波导内可以通过产生两个幅值相等但相位相差 $\pm \pi/2$ 的线极化波来实现线极化波向圆极化波的转变. 为了产生 TE_{mn} 波或者 (TM_{mn} 波) 圆极化波, 采用如图 1 所示的光滑圆波导结构, 其中波导半径沿轴向的变化关系为:

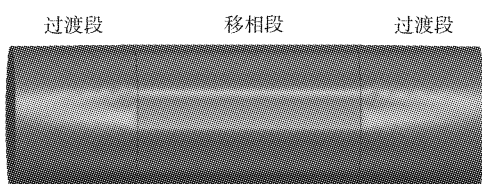


图1 圆极化器的结构图

Fig. 1 Schematic of the polarizer

$$r(\phi, z) = a_0 + a_1(z) \cos(2m\phi) \quad (1)$$

其中:

$$a_1(z) = \begin{cases} \frac{bz}{l_1} & 0 \leq z < l_1 \\ b & l_1 \leq z \leq l_1 + l_2 \\ -\frac{b(z - 2l_1 - l_2)}{l_1} & l_1 + l_2 < z \leq 2l_1 + l_2 \end{cases},$$

a_0 为圆波导平均半径, b 为最大扰动量, 且 $a_0 \gg b$, l_1 和 l_2 分别表示过渡段和移相段的长度. 假定入射波为线极化 $TE_{s,1}$ 波, 过渡段的输出横截面则如图 2 所示. 当线极化 TE_{mn} ($m \neq 0$) 波或者 TM_{mn} ($m \neq 0$) 波进入过渡段后, 如果其最大的纵向电场沿图 E_{rA} 或 E_{rB} 所示方向传播时就会被分解成两个分量 E_{r1} 和 E_{r2} , 从而实现了将一个线极化波分解成两个正交的线极化波的功能. 通过调整形变量的值, 就可以实现两个线极化波的等幅值输出. 随着电磁波向前传输进入移相段后, 由于移相段波导结构的不均匀, 使得线极化波 E_{r1} 和 E_{r2} 有着不一样的传播常数. 因此, 通过选择合适移相段的长度就能使得两个线极化波之间的相位差达到 $\pi/2$. 因此, 线极 TE_{mn} 波 (或者 TM_{mn} 波) 经过图 1 所示的波导结构后就能被转换为圆极化 TE_{mn} 波 (或者 TM_{mn} 波).

2 圆极化器的设计

由于圆极化器采用的是微变的波导结构, 因而

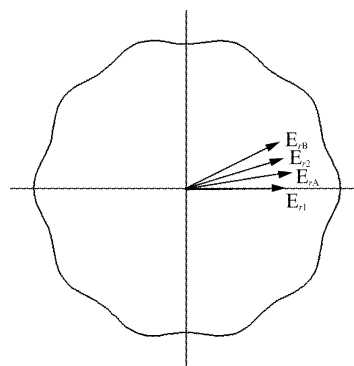


图2 移相器横截面示意图, E_{rA} 和 E_{rB} 代表入射的线极化波的径向最大电场分量, E_{r1} 和 E_{r2} 为波导内最大相位差对应的电场分量组合

Fig. 2 The cross section view of the phase shift, orientation of ordinary E_{rA} and cross-polarized E_{rB} radial electric filed components, as well as the components E_{r1} and E_{r2} with the greatest difference in propagation constants

可利用耦合波理论对其进行分析. 设计的圆极化在角向方向上的变化次数与输入模式 TE_{mn} 模 (或者 TM_{mn} 模) 场分量变化次数存在:

$$m - (-m) = 2m \quad (2)$$

满足角向耦合条件^[12], 故输入的 TE_{mn} 模 (或者 TM_{mn} 模) 会被耦合到 TE_{-mn} 模 (或者 TM_{-mn} 模), m 取正负值仅表示极化方向不同. 因而, 光滑波导圆极化器的设计可以转化为求解耦合波方程的方式来实现, 其中耦合波方程的基本形式为^[12-13]:

$$\frac{dA_{m'n'}^+}{dz} = -\gamma_{m'n'} A_{m'n'}^+ - j \sum [C_{(m'n')(mn)}^+ A_{mn}^+ + C_{(m'n')(mn)}^- A_{mn}^-] \quad (3)$$

$$\frac{dA_{m'n'}^-}{dz} = -\gamma_{m'n'} A_{m'n'}^- + j \sum [C_{(m'n')(mn)}^+ A_{mn}^- + C_{(m'n')(mn)}^- A_{mn}^+] \quad (4)$$

式中 A_{mn}^+ 与 A_{mn}^- 分别表示正向与反向传播的 mn 波的幅值, $C_{(m'n')(mn)}^+$ 与 $C_{(m'n')(mn)}^-$ 分别表示 mn 波与同向及反向 $m'n'$ 波之间的耦合系数; $\gamma_{m'n'} = \alpha_{m'n'} + j\beta_{m'n'}$ 为 $m'n'$ 波的传播常数, $\alpha_{m'n'}$ 为衰减常数, $\beta_{m'n'}$ 为相位常数, 且均为 z 的函数.

$TM_{mn} \rightarrow TM_{-mn}$ 的耦合系数为:

$$C(z) = \frac{j}{2a^2} \cdot \frac{X_m^2 (X_m^2 + m^2) a_1(z)}{\beta (X_m^2 - m^2)} \quad (5)$$

$TM_{mn} \rightarrow TM_{-mn}$ 的耦合系数为:

$$C(z) = \frac{-j}{2a^2} \cdot \frac{X_m^2 a_1(z)}{\beta} \quad (6)$$

其中, X_m 为 m 阶第一类贝塞尔函数(对于 TE_{mn} 波)或者其导数(对于 TM_{mn} 波)为零的第 n 个根, a 为波导半径, a_1 为波导形变量. 为了实现输出的两个模式间相位差能为 $\pi/2$, 在求解耦合波方程组时要求^[14-15]:

$$\left| \int_0^{2l_1+l_2} C(z) dz \right| = \pi/4 \quad (7)$$

考虑前向波之间的相互耦合问题, 求解式(3-4)就可以获得圆极化器内的模式沿 z 轴的变化情况.

设计一个入口半径 7.52 mm, 中心频率为 93 GHz、工作模式为 $TE_{5,1}$ 的圆极化器. 根据上述分析结果, 采用如图 2 所示所示的移相段横截面结构, 同时对包括过渡段的长度 l_1 , 移相段长度 l_2 , 角向微扰量 a_1 等结构参数进行优化设计. 应用龙格-库塔法编写相应的计算程序, 求解耦合波方程组. 以输出端口处输出左旋模式的幅值为目标, 对几何参数进行优化, 实现将线极化波 $TE_{5,1}$ 转化成圆极化波 $TE_{5,1}$ 的目的. 图 3(a) 为计算得到的圆极化器功率沿轴向分布图, 左旋线极化 $TE_{5,1}$ 波进入圆极化器后逐渐激励起右旋 $TE_{-5,1}$ 波, 在输出口时两个旋向不同

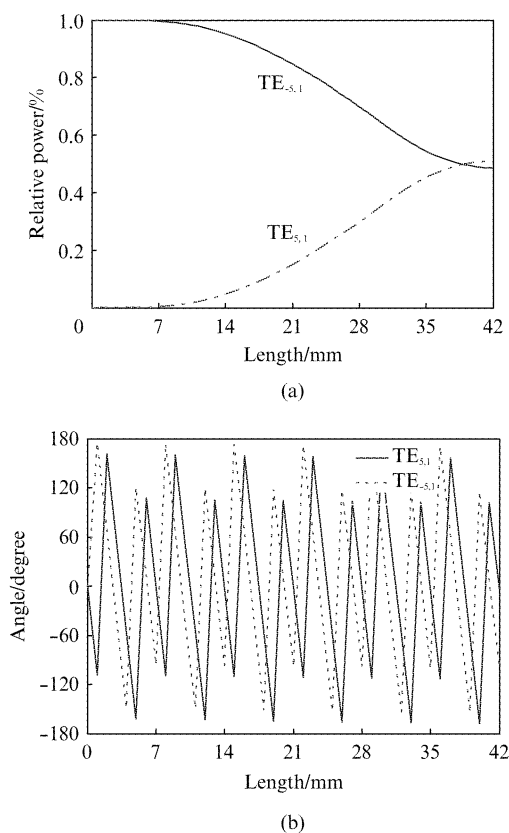


图3 输入模式的功率(a)和相位(b)在模式转换器的变化情况
Fig.3 (a) The power and (b) phase of the input modes along the mode converter

的圆极化波幅值相等. 图 3(b) 给出了两个模式的相位沿轴向的变化情况, 在圆极化器的输出口两者的相位差为 $\pi/2$. 显然, 设计的圆极化器已经将线极化波转换成了圆极化波.

3 仿真实验及分析

为了验证设计结果的有效性, 采用电磁仿真软件 CST 对设计的圆极化器进行了计算^[16]. 由于圆极化波可以分解成幅值相等且相位相差 90° 的两个线极化器波, 故针对仿真得到的 $TE_{5,1}$ 模和 $TE_{-5,1}$ 模的幅值及相位关系进行讨论. 图 4(a) 为输出模式的幅值随频率的变化关系, 在 88 ~ 98 GHz 的范围内, 输出的两个模式之间的最大幅值差小于 0.06, 其中在 93 GHz 时, 两者幅值完全相等, 均为 0.705 6; 图 4(b) 为输出端口处两个模式的相位随频率的变化关系. 在考虑的频带范围内, $TE_{5,1}$ 模和 $TE_{-5,1}$ 模之间的相位差基本上为 90° . 显然, 电磁仿真结果与数值计算结果符合良好, 从而有效地证明了圆极化器设计方法的可行性.

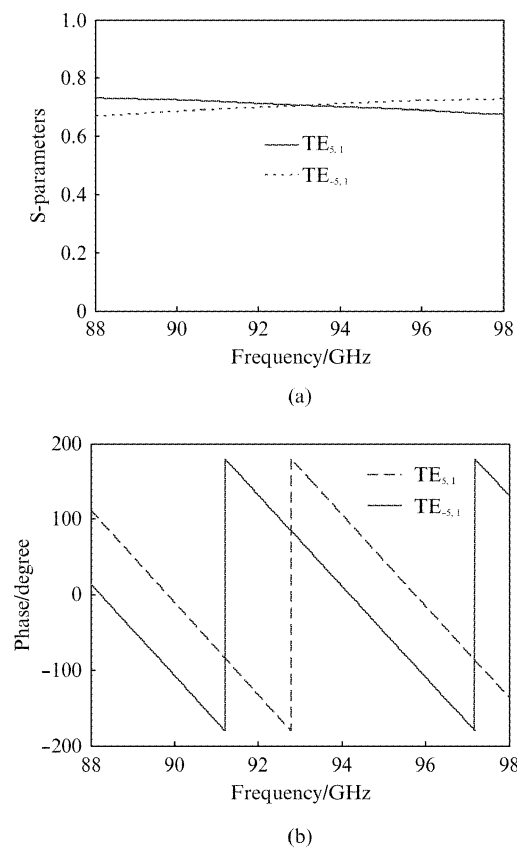


图4 CST 仿真得到的输出模式的功率(a)和相位(b)随频率的变化
Fig.4 The output mode power (a) and phase (b) vs frequency obtained from the CST stimulation

为了进一步评价圆极化的性能,考察了设计的圆极化器的轴比 $R^{[17]}$,其中:

$$R = \frac{\sqrt{1+K^2+2K\sin\theta} + \sqrt{1+K^2-2K\sin\theta}}{\sqrt{1+K^2+2K\sin\theta} - \sqrt{1+K^2-2K\sin\theta}}$$

$$K = \left| \frac{A_1}{A_2} \right|, \quad (8)$$

式中 A_1 和 A_2 为输出两个模式的幅值, θ 为两者之间的相位差.图5为输出的圆极化波的轴比与频率的关系,在88~98 GHz的频带内,最大轴比低于1.18.显然,设计的圆极化器可以很好地将线极化波转化成圆极化波.

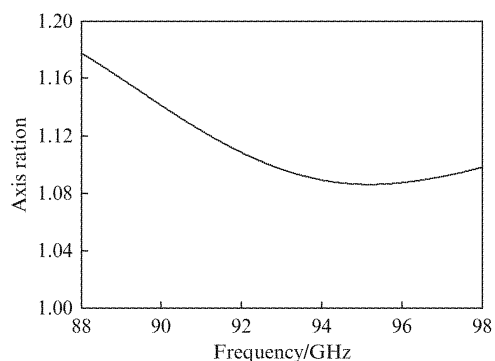


图5 圆极化器输出轴比与频率的变化关系
Fig. 5 The axial ratio vs frequency at the output port of the mode converter

4 实物加工与测试

根据计算结果,对设计的 $TE_{5,1}$ 模式圆极化器进行加工.根据其结构的组成,圆极化器被分成三段进行加工.为了装配紧凑和准确,部件间采用销钉进行定位.图6显示了装配好的圆极化器以及用于测试用的 $TE_{5,1}$ 模式线极化发生器.图7为用于辐射场测试的装置图.圆极化器一端连接线极化 $TE_{5,1}$ 模式发生器,另一端直接辐射(这里由于输出波导口径远大于工作模式截至的口径,因而忽略了反射波的影响).采用WR10开口波导对微波信号进行探测,接收到的微波信号经功率计监测后被记录在控制系统中.通过二维扫描平台改变开口波导的空间位置实现了对空间场分布的测试.考虑到功率计的动态范围及辐射出来的功率强度,开口波导与辐射口之间的距离选定为50 mm.

图8为在不同频率下远场辐射的测试图.为了便于对比,图9给出了理想状态下的圆极化器 $TE_{5,1}$ 波辐射图.显然,两者的场分布基本一致,表明设计的圆极化器已经实现了将线极化转化成圆极化的功

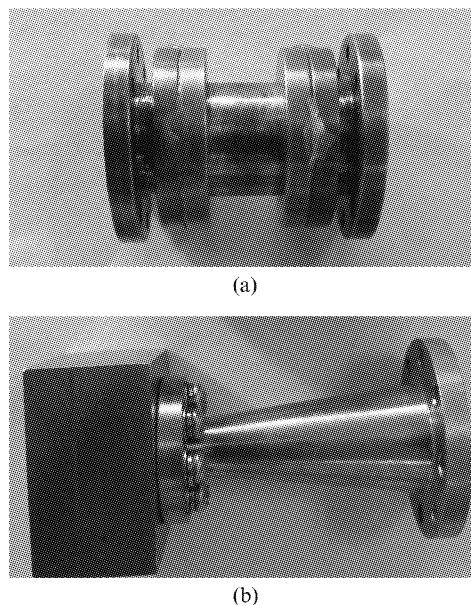


图6 (a)加工后的 $TE_{5,1}$ 模圆极化器,
(b)用于测试用的线极化发生器
Fig. 6 (a) The assembled $TE_{5,1}$ mode polarizer, (b) the linear wave generator used in the measurement

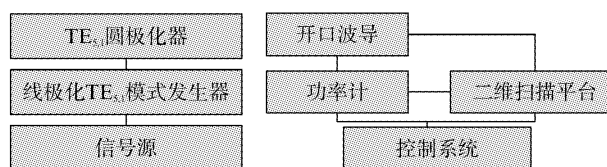


图7 远场测试平台
Fig. 7 The platform for the far-field measurement

能.需要指出的是,与对应的理想的场分布相比,测试得到的场分布分割不明显,且测试得到场中心分布不规则.导致上述现象原因是在现有的测试条件下难以保证开口波导与圆极化器的辐射口保持完全平行,从而导致测试得到的场分布不再是圆极化器单一极化辐射场.同时,在对同一频点的不同极化平面的场分布进行测试时,开口波导调整前后的极化方向也难以实现完全正交,从而使得测试结果不再是单一极化的场分布.此外,开口波导本身的影响也同样会改变辐射场的空间分布.

5 结论

介绍了一种新型高阶圆波导模式圆极化器,并对其进行了原理分析、优化设计和实验研究.工作频率在88~98 GHz范围内, $TE_{5,1}$ 模圆极化器轴比小于1.18 dB,可以很好地实现线极化波向圆极化波的转变.场辐射测试结果验证了圆极化器的有效

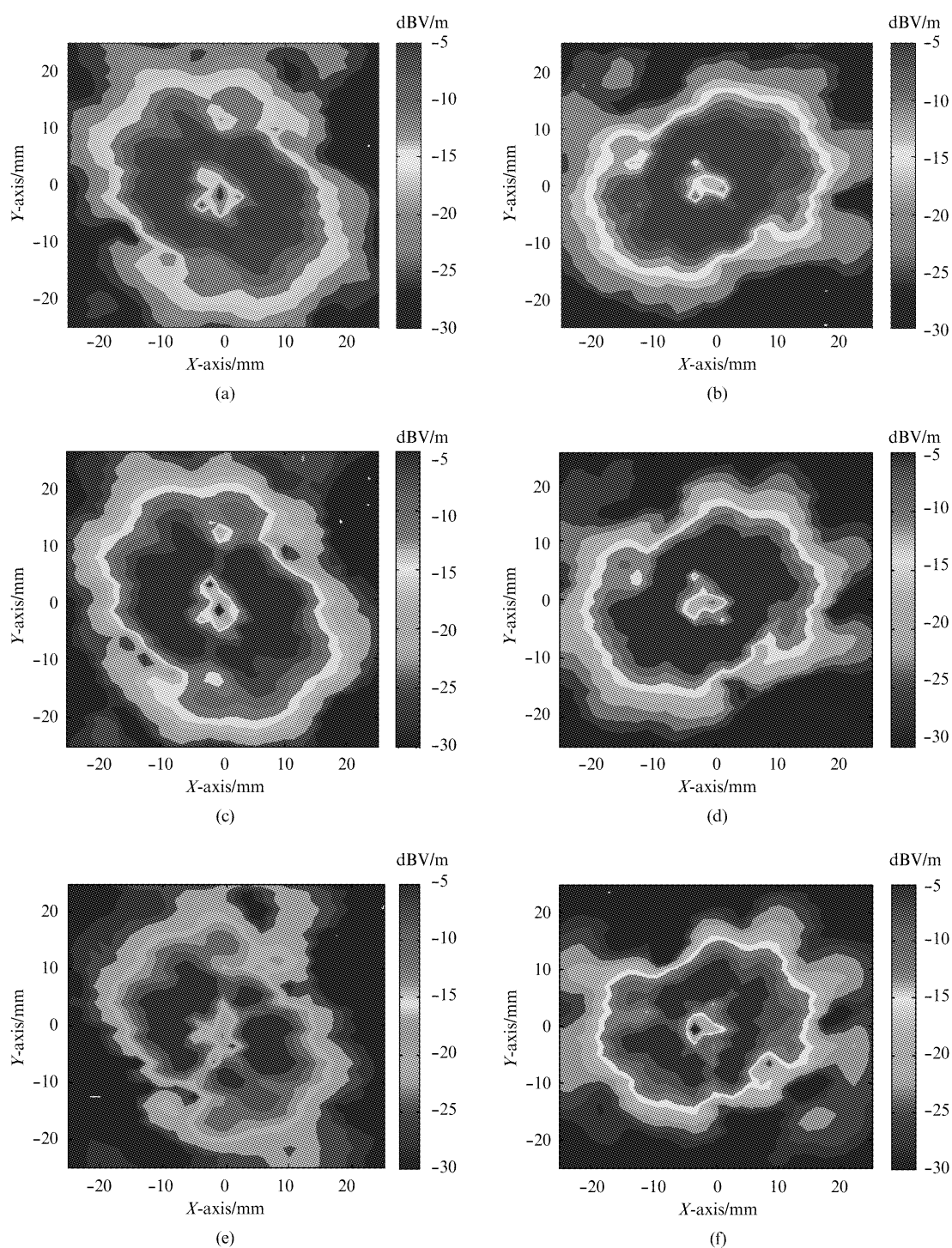


图8 圆极化器不同频率下的远场辐射图(a)、(c)和(e)为水平极化的场分布辐射图,(b)、(d)和(f)为垂直极化的场分布辐射图

Fig. 8 The field patterns launched from the polarizer at different frequency (a), (c) and (e) are the radiation patterns of the horizontal polarization, (b), (d) and (f) are the radiation patterns of the vertical polarization

性. 这种圆极化器结构简单, 便于实现. 该方法除了可以用来设计高阶模式的圆极化器外, 同样适用于如 $TE_{1,1}$ 、 $TE_{2,1}$ 等常用低阶模式圆极化器的设计. 由

于不需要使用膜片、介质板等调节器件, 可以显著提高圆极化器的功率容量, 因而可为高功率微波圆极化器的设计与应用提供参考.

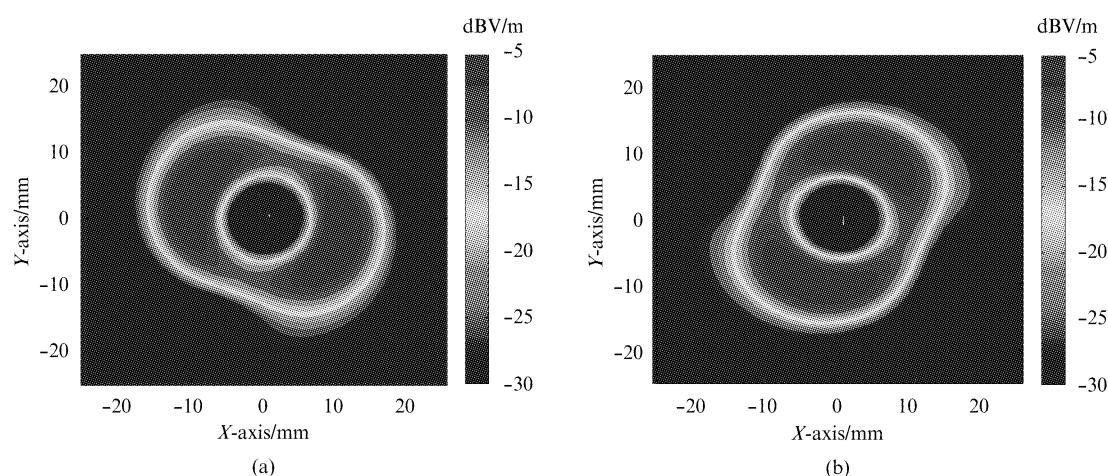


图9 理想状态下的 $TE_{5,1}$ 模圆极化器的远场辐射图 (a) 水平极化, (b) 垂直极化

Fig. 9 The radiation field patterns for the idea $TE_{5,1}$ mode polarizer (a) horizontal polarization, and (b) vertical polarization

References

- [1] Thumm M, Kasperek W. Passive high-power microwave components [J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2002, **30**(3): 755 – 786.
- [2] Thumm M. Recent developments on high-power gyrotrons—introduction to this special issue [J]. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Wave*, 2011, **32**(3): 241 – 252.
- [3] Kumar N, Singh U, Singh T P, et al. A review on the applications of high power, high frequency microwave source: gyrotron [J]. *Journal of Fusion Energy*, 2011, **30**(4): 257 – 276.
- [4] Aleksandrov N L, Chirkov A V, Denisov G G, et al. Selective excitation of high-order modes in circular wave guide [J]. *International Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 1992, **13**(09): 1369 – 1385.
- [5] Pereyaslavets M, Braz O, Kern S, et al. Improvements of mode converters for low-power excitation of gyrotron-type modes [J]. *International Journal of Electronics*, 1997, **82**(01): 107 – 115.
- [6] LI Shao-Fu, ZHANG Cong-Hui, WANG Zhong, et al. Quasi-optical millimeter wave rotating TE_{62} mode generator [J]. *High Power Laser and Particle Beams* (李少甫, 张从会, 王忠, 等. 准光激励毫米波圆波导旋转 TE_{62} 模式产生器. *强激光与粒子束*) 2011, **23**(8): 2174 – 2178.
- [7] Bogdashov A A, Chirkov A V, Denisov G G. High-efficient mode converter for ITER gyrotron [J]. *International Journal of Infrared and Millimeter Waves*. 2005, **26**(06): 771 – 785.
- [8] Chang T H, Lee C H, Wu C N, et al. Exciting circular TE_{mn} modes at low terahertz region [J]. *Appl. Phys. Lett*, 2008, **93**(11): 111503.
- [9] Chang T H, Li C H, Wu C N, et al. Generating pure circular TE_{mn} modes using Y-type power dividers [J]. *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, 2010, **58**(6): 1543 – 1550.
- [10] WANG Zhi-Jian. Study of millimeter wave quasioptical mode converter and its measurements technology [D]. Chengdou: University of Electronic Science and Technology of China (王志坚. 毫米波准光模式变换器及测设技术的研究. 成都: 电子科技大学) 2010.
- [11] XIE Chong-Fang, RAO Ke-Jin. *Electromagnetic field and electromagnetic waves (the fourth edition)* [M]. Higher Education Press (谢处方, 饶克谨. 电磁场与电磁波 (第4版). 高等教育出版社) 2005.
- [12] WANG E-Feng, LI Hong-Feng, LI Hao, et al. Study of the helical waveguide [J]. *Acta Physica Sinica* (王峨峰, 李宏福, 李浩, 等. 螺旋波纹波导研究. *物理学报*) 2005, **54**(11): 5339 – 5343.
- [13] NIU Xin-Jian. Study of high power microwave transmission line and mode conversion [D]. Chengdou: University of Electronic Science and Technology of China (牛新建. 高功率微波传输线及模式变换研究. 成都: 电子科技大学) 2010.
- [14] Doane J L. Polarization converters for circular waveguide mode [J]. *Int. J. Electronics*, 1986, **61**(6): 1109 – 1133.
- [15] Thumm M, Kumric H. High-power TE_{11} and TM_{11} circular polarizer in oversized waveguide at 70 GHz [J]. *International Journal of Infrared and Millimeter*, 1989, **10**(9): 1059 – 1076.
- [16] CST Microwave Studio; Computer Simulation Technology AG [Online] Available: <http://www.cst.com>.
- [17] ZHAO Chun-Hui, YANG Shen-Yuan. The optimization design of ultra-wide band line polarization device [J]. *Journal on communications* (赵春晖, 杨莘元. 超宽带折线圆极化器的优化设计. *通信学报*), 1996, **17**(1): 97 – 110.