

高功率微波 TM_{01} 模式移相器*

赵雪龙,袁成卫,刘列,彭升人,白珍,蔡丹
(国防科技大学光电科学与工程学院,湖南长沙 410073)

摘要:研制了一种新型的 TM_{01} 模式高功率微波移相器,这种移相器通过两个十字交叉圆极化器结构可以将高功率微波输出相位进行 $0^\circ \sim 360^\circ$ 的调节。对构成这种移相器的 TE_{11} 圆极化器及移相器的电磁特性通过电磁仿真软件 CST 进行了仿真,仿真结果表明此移相器可以对 1.75GHz 的 TM_{01} 模式进行 $0^\circ \sim 360^\circ$ 调节,并且误差不超过 1° ,在 $0^\circ \sim 360^\circ$ 调节范围内的传输效率均大于 97%,且功率容量大于 4.3GW。

关键词:高功率微波;功率合成;模式转换;移相器

中图分类号:TN814 文献标志码:A 文章编号:1001-2486(2015)02-040-03

TM_{01} mode phase shifter for high power microwave

ZHAO Xuelong, YUAN Chengwei, LIU Lie, PENG Shengren, BAI Zhen, CAI Dan

(College of Optoelectronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: A novel TM_{01} mode high power microwave phase shifter is proposed which is composed of two crossed circularly polarized TE_{11} mode converter. The phase of the output microwave can be adjustable in a range of $0^\circ \sim 360^\circ$. The electromagnetic behaviors of the circularly polarized TE_{11} mode converter and the phase shifter are simulated by the software CST. The results show that the output microwave can be adjustable in a range of $0^\circ \sim 360^\circ$ at the frequency of 1.75GHz with the error is not more than 1° , the transmission efficiency in this range is larger than 97%, and the power capacity is larger than 4.3GW.

Key words: high power microwave; power combination; mode converter; phase shifter

随着高功率微波技术(High Power Microwave, HPM)的发展,研究人员在输出微波功率方面做了大量的工作。即使很多微波源的输出功率已经达到 GW 级的水平,但是在很多应用方面,仍然难以满足应用需要。为了获得更高功率的微波输出,功率合成技术的研究很有必要。而运用高功率微波相位控制的空间功率合成是产生更高微波功率输出的有效途径之一。移相器是改变微波相位应用于功率合成的关键部件。在常规微波功率合成技术中,移相器发展非常成熟,主要应用的有两种,分别是铁氧体移相器^[1]和二极管移相器^[2]。然而这些移相器受限于其功率容量较低^[3],传统的移相器功率容量只有几千瓦^[1-2],但是在高功率微波领域,需要移相器具有最少百兆瓦以上的功率容量,所以传统移相器只能应用于雷达和通信,并不能直接应用于高功率微波领域。移相器直接应用于高功率微波的报道很少,文献

[4]中工作频率为 15.2GHz 矩形波导宽边可调移相器在 1W 的 TE_{10} 模式微波注入情况下,最高场强达到 9.72kV/m,在真空环境下,估计功率容量可以达到 112.9MW。目前很多高功率微波源输出模式为 TM_{01} 模式,但用于对输出的 TM_{01} 模式微波直接进行相位调节并合成的移相器还未见报道。赵雪龙等设计了一种具有高功率容量、高传输效率的 TM_{01} 模式移相器,并通过电磁仿真方法进行了验证, TM_{01} 模式移相器的实现为高功率微波的功率合成提供了一种选择。

1 分析和仿真

TM_{01} 移相器由两个相同的 TE_{11} 模式圆极化器^[5]轴向反接构成,如图 1 所示。

其中,每一个 TE_{11} 圆极化器单独仿真时,注入模式为 TM_{01} ,输出模式主要成分为两个正交极化的 TE_{11} 模式。图 2(a)为两个正交极化的 TE_{11}

* 收稿日期:2015-01-09

基金项目:国家自然科学基金资助项目(11305263)

作者简介:赵雪龙(1987—),男,辽宁朝阳人,博士研究生,E-mail:longlongfeiyue123@163.com;

袁成卫(通信作者),男,研究员,博士,硕士生导师,E-mail:ehfz_ycw@163.com

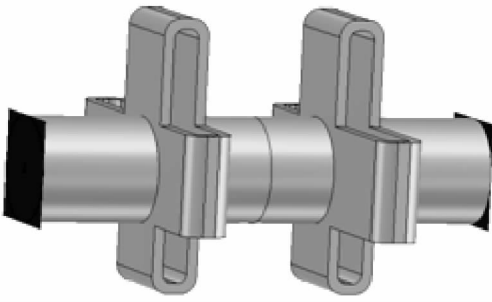
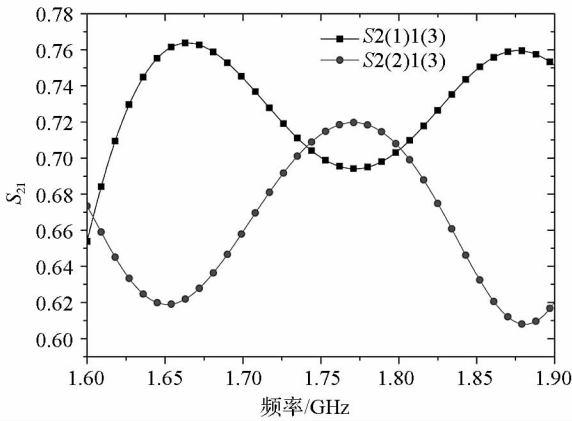


图1 TM₀₁ 移相器结构图

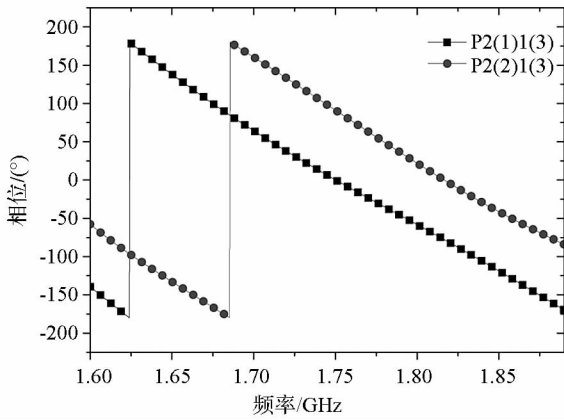
Fig.1 The structure of TM₀₁ phase shifter

模式的透射系数 S_{21} 随频率变化曲线(其中括号中的 1,2,3 分别代表空心圆波导的前三个模式:TM₀₁ 和两个正交极化的 TE₁₁)。从图 2(a) 中可以看



(a) S_{21} 曲线

(a) S_{21} curves



(b) 相位曲线

(b) Phase curves

图2 圆极化器输出正交极化 TE₁₁ 模式曲线

Fig.2 Curves of orthogonal polarized TE₁₁ modes of output microwave from circularly polarized converter

出,输出模式在中心频点处为两个简并的 TE₁₁ 模式,极化方向互相垂直,两个 TE₁₁ 模式在中心频点 1.75GHz 处 S_{21} 均在 0.7 左右,说明输出模式中其他模式所占比例可以忽略不计。图 2(b) 为圆

极化器输出两个简并 TE₁₁ 模式相位随频率变化曲线,从图 2(b) 中可以看出两个简并 TE₁₁ 模式在中心频点 1.75GHz 处相位差在 90° 左右。根据所得到的两个极化方向输出 TE₁₁ 模式的 S_{21} 和相位,可以得到圆极化器输出 TE₁₁ 模式的轴比 AR^[6] 为:

$$AR = \frac{\text{长轴}}{\text{短轴}} = \begin{cases} \sqrt{b/a} (a < b) \\ \sqrt{a/b} (a > b) \end{cases}$$

$$= \begin{cases} \sqrt{\frac{(S_{21}^{\text{TE}_{11}^x} \cos \tau)^2 + S_{21}^{\text{TE}_{11}^x} S_{21}^{\text{TE}_{11}^y} \sin 2\tau \cos(\phi_x - \phi_y) + (S_{21}^{\text{TE}_{11}^y} \sin \tau)^2}{(S_{21}^{\text{TE}_{11}^x} \sin \tau)^2 - S_{21}^{\text{TE}_{11}^x} S_{21}^{\text{TE}_{11}^y} \sin 2\tau \cos(\phi_x - \phi_y) + (S_{21}^{\text{TE}_{11}^y} \cos \tau)^2}} \\ \sqrt{\frac{(S_{21}^{\text{TE}_{11}^y} \sin \tau)^2 - S_{21}^{\text{TE}_{11}^x} S_{21}^{\text{TE}_{11}^y} \sin 2\tau \cos(\phi_x - \phi_y) + (S_{21}^{\text{TE}_{11}^x} \cos \tau)^2}{(S_{21}^{\text{TE}_{11}^x} \cos \tau)^2 + S_{21}^{\text{TE}_{11}^x} S_{21}^{\text{TE}_{11}^y} \sin 2\tau \cos(\phi_x - \phi_y) + (S_{21}^{\text{TE}_{11}^y} \sin \tau)^2}} \end{cases}$$

式中, $S_{21}^{\text{TE}_{11}^x}$ 和 $S_{21}^{\text{TE}_{11}^y}$ 分别表示输入 TM₀₁ 模向输出 x 极化 TE₁₁ 模和 y 极化 TE₁₁ 模转换的 S_{21} 参数; ϕ_x 和 ϕ_y 表示输出 x 极化 TE₁₁ 模和 y 极化 TE₁₁ 模的相位,其中 $\tau = 0.5 \arctan \left[\frac{2S_{21}^{\text{TE}_{11}^x} S_{21}^{\text{TE}_{11}^y} \cos(\phi_x - \phi_y)}{(S_{21}^{\text{TE}_{11}^x})^2 - (S_{21}^{\text{TE}_{11}^y})^2} \right]$

为椭圆极化波的倾角。

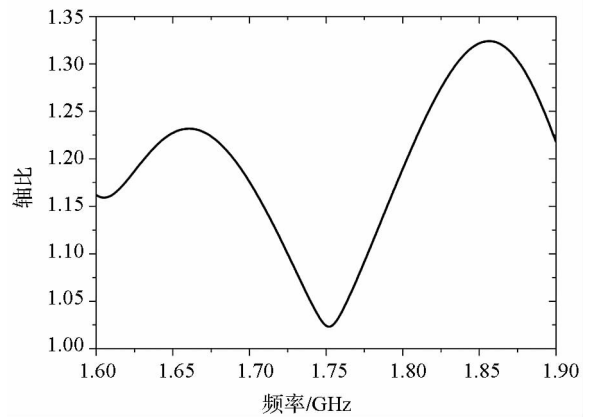


图3 圆极化器输出 TE₁₁ 模式轴比

Fig.3 Axial ratio of output TE₁₁ mode

图3 为轴比随频率变化曲线,从图3 中可以看出在中心频点 1.75GHz 处的轴比为 1.02,且在 1.6GHz ~ 1.9GHz 处的轴比小于 1.35。

将两个圆极化器沿轴向反向连接在一起,通过角向旋转改变两圆极化器所成角度,即可以对输出微波的相位进行调整。

TM₀₁ 模式移相器具体工作过程如图 4 所示,圆极化器将输入的 TM₀₁ 模式(图 4A)通过十字正交臂功分端转化四个幅度相等的矩形波导 TE₁₀ 模式,通过调整十字正交臂四个臂的长短使输出 TE₁₀ 模式分别有 90° 的相移,再将四个具有 90° 相移的 TE₁₀ 模式通过十字正交臂的功合端合成输出圆波导圆极化 TE₁₁ 模式(图 4B),圆极化 TE₁₁ 模式再通过另一个相同的反向连接的 TE₁₁ 圆极化器转化为 TM₀₁ 模式(图 4C)输出,在这个过程

中,通过角向扭转两个圆极化器,即可以获得与扭转角度相等的相对移相度数。

仿真结果显示,在扭转角度随机(取 60°)输入功率为 0.5W 情况下,电场最大值为 750V/m, Barker^[7]实验中的结论显示金属表面射频击穿场强可大于 1MV/cm,即使按金属表面射频击穿场强为 700kV/cm 估算,此移相器功率容量大于 $(\frac{700kV/cm}{750V/m})^2 \times 0.5W = 4.35GW$,其他扭转角度功率容量变化不大。

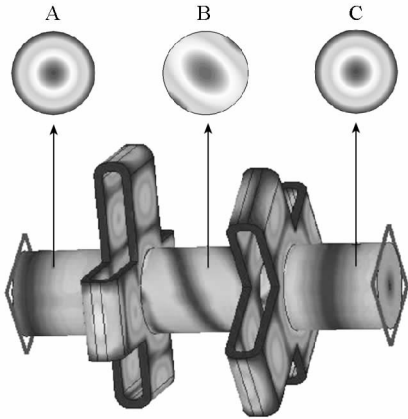


图 4 移相器中两圆极化器扭转相对角度 60° 电场分布图

Fig. 4 Electric field distribution of phase shifter when relatively rotation angle of two polarized TE₁₁ converter is 60°

图 5 为 TM₀₁ 移相器传输效率随相对扭转角度的变化曲线,每隔 10° 扭转 1 次。从图 5 中可以看出,在扭转 210° 时传输效率最大,达到 99.75%,在扭转 290° 时,传输效率最小为 97.25%,传输效率均大于 97%。

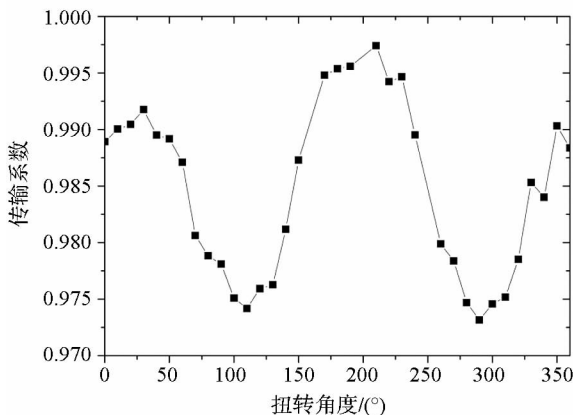


图 5 TM₀₁ 移相器传输效率随相对扭转角度的变化曲线

Fig. 5 Transmission efficiency curve of TM₀₁ phase shifter with the change of relative rotation angle

图 6 为 TM₀₁ 移相器相对相移度数随相对扭转角度的变化曲线,从图 6 中可以看到,相移度数随

两个圆极化器相对扭转角度的线性变化呈线性变化,且与相对扭转角度基本一致,误差在 1° 以内。

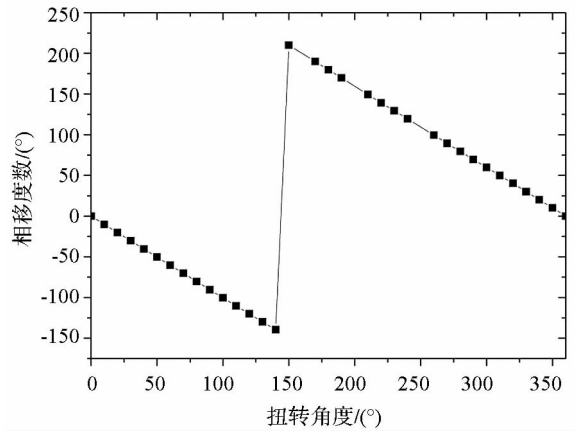


图 6 TM₀₁ 移相器相对相移度数随相对扭转角度变化曲线

Fig. 6 Phase shift degrees curve of TM₀₁ phase shifter with the change of relative rotation angle

2 结论

本文提出了一种应用于高功率微波的 TM₀₁ 移相器,介绍了移相器的构成,并对移相器移相性能进行了仿真,仿真结果显示,在中心频率为 1.75GHz 情况下,移相器能够使微波输出相位随着两个圆极化器相对扭转角度的线性变化而改变,且基本与扭转角度相等,误差在 1° 范围内;传输效率在 0° ~ 360° 相移过程中均大于 97%,且功率容量均大于 4.3GW,符合高功率微波移相器设计要求;这种移相器的设计为实现高功率微波的功率合成提供了一种选择。

参考文献 (References)

[1] Erker E G, Nagra A S, Liu Y, et al. Monolithic Ka-band phase shifter using voltage tunable BaSrTiO₃ parallel plate capacitors[J]. IEEE Microwave and Guided Wave Letters, 2000, 10(1): 10 - 12.

[2] Malczewski A, Eshelman S, Pillans B, et al. X-band RF MEMS phase shifters for phased array applications[J]. IEEE Microwave and Guided Wave Letters, 1999, 9 (12): 517 - 519.

[3] Li X Q, Liu Q X, Wu X J, et al. A GW level high-power radial line helical array antenna [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2008, 56(9): 2943 - 2948.

[4] Yang Y M, Yuan C W, Qian B L. A novel phase shifter for Ku-band high-power microwave applications [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2014, 42(1): 51 - 54.

[5] Peng S, Yuan C, Zhong H, et al. Design and experiment of a cross-shaped mode converter for high-power microwave applications[J]. Review of Scientific Instruments, 2013, 84 (12): 124703.

[6] 林昌禄. 天线工程手册[M]. 北京:电子工业出版社,2002. LIN Changlu. Handbook of antenna engineering[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry Press, 2002. (in Chinese)

[7] Barker R J, Schamiloglu E. High-power microwave source and technologies[M]. New York: IEEE Press, 2001.