

一种高功率微波空间滤波器的设计与初步实验研究

李国林[†] 舒 挺 袁成卫 张 军 靳振兴 杨建华 钟辉煌 杨 杰 武大鹏

(国防科学技术大学光电科学与工程学院, 长沙 410073)

(2010 年 1 月 25 日收到; 2010 年 7 月 9 日收到修改稿)

研究了一种新型高功率微波空间滤波器(双工器),该空间滤波器通过放置在天线近场的周期性金属圆柱阵列实现线极化波的反射和透射.通过对比研究低功率条件下放置该双工器前后的辐射方向图,发现该双工器对 S 波段微波的反射效率达到 96%,对 X 波段微波的透射效率达到 97%,隔离度分别达到 25 dB 以上,交叉耦合度在 -25 dB 以下.在 S/X 波段各自注入 1.5 GW 的高功率微波,脉冲宽度为 100 ns 的条件下,放置双工器后没有发现明显的微波脉冲缩短现象.

关键词: 高功率微波, 耦合输出, 空间滤波器, 双工器

PACC: 4280B, 3220D, 5270G

1. 引 言

近几十年来,随着脉冲功率技术的发展,国内外高功率微波技术取得了长足的进步^[1-7],不同波长的高功率微波都可以由单个高功率微波源产生,输出的功率很多达到 GW 量级.当今高功率微波器件朝着高功率、长脉冲宽度和多频率方向发展.而受到材料、工艺等方面的限制,单个微波源的输出能力有限,利用多个高功率微波源实现更高功率(同频或者非同频功率合成)、更长脉冲宽度和更多频率输出成为一种较为有效的手段,并已越来越受到人们的关注^[8-12].在同频率微波源耦合输出情况下,可以利用多个微波源锁相等方法进行相干合成^[13];在不同频率的多路微波源耦合输出情况下,需要一种具有频率双工(多工)功能的滤波器件来实现微波同向输出,并保证各路微波源的隔离^[14].2008 年,国防科学技术大学研制了一种 GW 级高功率微波空间滤波器^[9](图 1),这种空间滤波器利用了一组微波金属光子晶体组成的矩形导电栅结构实现了两路高功率微波的双工输出(双工器),两路微波的传输效率都达到了 97% 以上,隔离度达到了 -20 dB,在 GW 级高功率微波系统的应用中没有发现脉冲缩短现象,脉冲宽度约为 20 ns.然而随着微波功率和脉冲宽度的增加,微波脉冲较放置双工器

前出现了缩短,并且在矩形栅沿面出现了表面闪络,这两种现象表明在双工器内的双工栅附近出现了微波击穿现象.为了使器件在更高功率和更长脉冲宽度条件下工作,需要考虑一种新的结构.

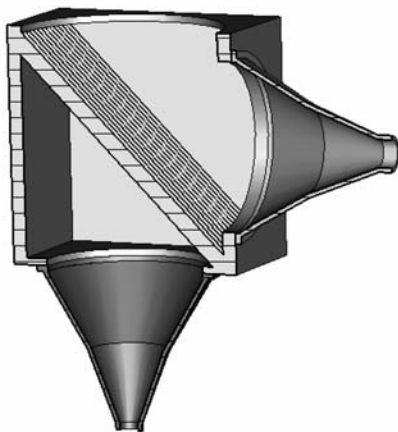


图 1 矩形栅双工器截面图

如果只考虑一种极化方向,图 1 和图 2 所示周期性阵列结构同为频率选择性表面,人们常利用其频率选择性制成天线馈电系统中的副反射面(双色镜)^[15, 16].本文拟用一个器件实现两种不同极化方向的高功率微波耦合输出,其空间滤波原理可以利用图 1 的结构作如下解释:当入射微波的电场极化方向与图 1 所示的截面平行时,以一定频率 45°角

[†] E-mail: nudt-liquolin@hotmail.com

斜入射的微波将被反射;当入射微波的电场极化方向与图 1 所示的截面垂直时,以一定频率 45° 角斜入射的微波将会透射. 因此,如果将该周期性结构放置于两个辐射方向互相垂直馈源喇叭的近场区域,可以实现两路不同频率的微波双工输出. 考虑到一般的高功率微波源所产生的微波具有非稳定的相位和频率,因此如果将上述双工器结构应用于 GW 级高功率微波系统中,除了需要研究该器件在所需频率段的反射和传输性能以外,还要研究其功率容量. 图 1 所示的双工器可以实现双波段高功率微波高效率透射和反射,但是由于该双工器由一系列薄而长的方条组成,不仅受限于加工工艺,而且在其四条方棱上容易引起场增强,因此本文考虑用图 2 所示的圆柱栅型双工器,并分别利用理论分析、低功率和高功率微波照射实验来研究其散射特性,从而证明该结构在高功率系统中应用的可行性.



图 2 圆柱型双工器

2. 理论分析与设计

如上所述,利用图 2 所示结构实现两路不同极化方向的高功率微波耦合输出,其原理与图 1 所示结构相同. 为了说明图 1 结构的原理及其功率容量,可以利用基于平面波展开的模式匹配法来求解金属方形栅条之间的场分布^[12, 17]. 首先将入射波定义为横电 (TE) 极化入射 (入射波电场极化方向与图 1 截面垂直) 或者横磁 (TM) 极化入射 (入射波电场极化方向与图 1 截面平行). 为了更加精确地求解双工器散射特性,考虑到交叉极化的问题,将其散射波展开成 TE 波和 TM 波各阶空间谐波的线性组合,各阶空间谐波的未知系数通过边界条件求解,以获得感兴趣的场分布. 以 TE 波入射为例,计算入射波电场幅度为 1 V/m ,入射频率为 9.6 GHz ,栅条厚度为 $2t$ 、栅周期为 $2h$ 时的电场分布,计算结果如图 3 所示.

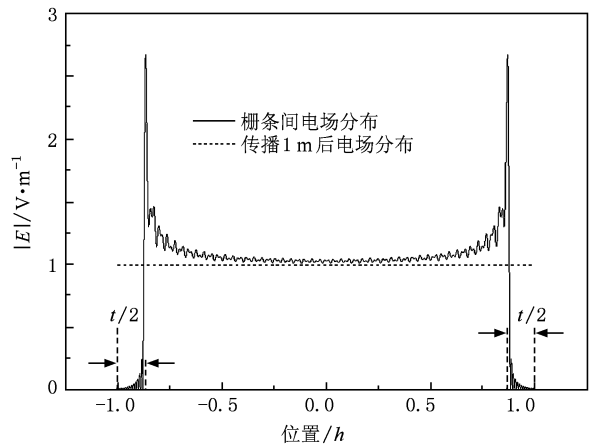


图 3 一个周期内双工栅沿面和传播 1 m 后的电场分布

由图 3 可以看出,微波穿透双工栅传播 1 m 后电场强度 E 变得均匀,较入射电场没有明显的幅度变化,说明 TE 极化波入射时具有较高的传输效率,但同时在双工栅沿面内和方形栅条的边缘出现了较强的场增强. 因此,在以前的 GW 级高功率微波辐照实验中容易出现如微波电场击穿现象. 降低场增强可将矩形栅双工器的边棱倒角,或者直接利用圆柱型双工器. 考虑到矩形栅双工器的方形栅条长度较长 ($1\text{--}2 \text{ m}$),在实际工程加工过程中,其倒角和表面处理较圆形导电柱困难,因此在新的双工器结构中选定了表面光洁度高的圆形导电柱 (图 4). 实际测量得到,圆形柱的表面光洁度达到 0.4 ,这为下一步的高功率实验提供了前提条件.

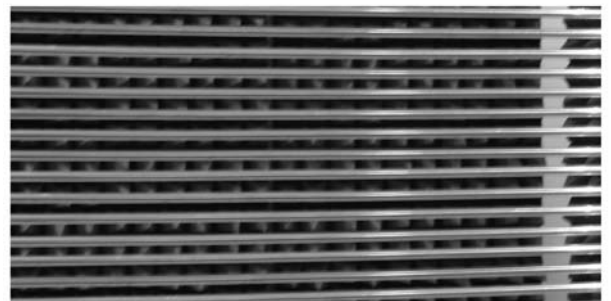


图 4 圆柱栅双工器照片

为了不影响双工器的传输性能,需要对圆柱形导电柱的外径 r 和周期 p ($p = 2h$) 进行优化. 同样利用基于平面波展开的模式匹配法来求解金属圆柱的散射矩阵. 在求解之前,先将金属圆柱按照图 5 所示的方法进行边界离散化 (yoz 平面的上半部分). 如果边界离散化程度足够高,则在计算圆柱形导电

柱的散射参数时完全可以将金属圆柱视为一系列被离散化了的方形导电柱的组合,而方形导电柱散射参数的求解与图 1 所示结构的方法完全一致,栅条沿 x 方向的厚度和 z 方向周期完全相同,只是沿 z 方向的厚度不同而已。

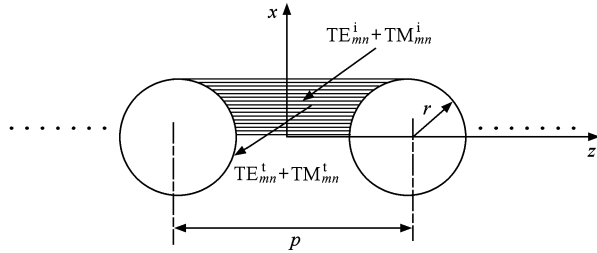


图 5 圆柱阵列边界条件的离散化

假设中间某个方形导电柱的入射波为 TE_{mn}^i 和 TM_{mn}^i 。当 TE_{mn}^i 波单独入射时,不仅能够产生 TE 散射波,而且能够产生 TM 散射波,对于 TM 波入射的情况也类似。因此,透射波 TE_{mn}^t 和 TM_{mn}^t 中包含了复杂的交叉极化波,这种交叉极化波可使双工器沿面出现场增强。设根据边界条件求解得到散射矩阵为

$$S = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix}, \quad (1)$$

其中 A 和 D 表示纯 TE 和 TM 极化波的传输矩阵, B 和 C 表示交叉耦合矩阵。注意到上一层方形导电柱的散射波为下一层方形导电柱的入射波,因此,在求解完单个被离散化了的方形导电柱的散射矩阵后,可以将各个散射矩阵进行级联,并根据对称性原理得到整个圆柱阵列的散射矩阵,并以此获得其传输系数、反射系数和交叉极化耦合度。图 6 和图 7 分别给出了圆柱周期 p 和圆柱半径 r 对其散射性能的影响。

由图 6 和图 7 可以看出:当圆柱半径 r 一定时,随着圆柱周期 p 的增大,透射效率逐渐增大,而反射效率逐渐降低;当圆柱周期 p 一定时,随着圆柱半径 r 的增大,透射效率有一个最大值,而反射效率逐渐增大;另一方面,当圆柱半径 r 一定的情况下,圆柱周期 p 越大,金属圆柱之间的场增强越低,从而使功率容量更高。综合考虑以上三个因素,选择了导电圆柱参数 $p = 40 \text{ mm}$, $r = 9.5 \text{ mm}$,而此时计算得到的交叉极化耦合度在 -28 dB 以下。

3. 实验研究

为了对加工的空间滤波器性能进行实验验证,

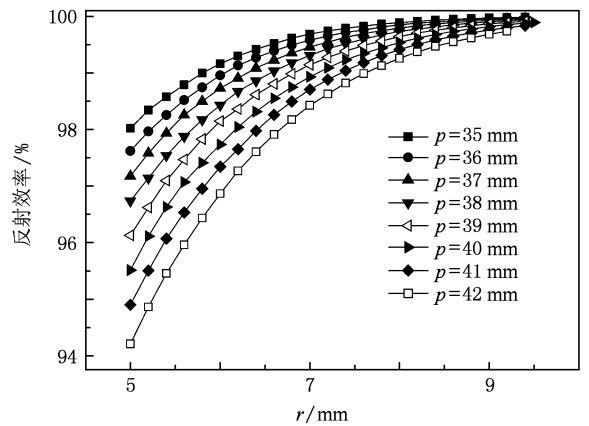


图 6 圆柱半径 r 和周期 p 对 S 波段微波反射效率的影响

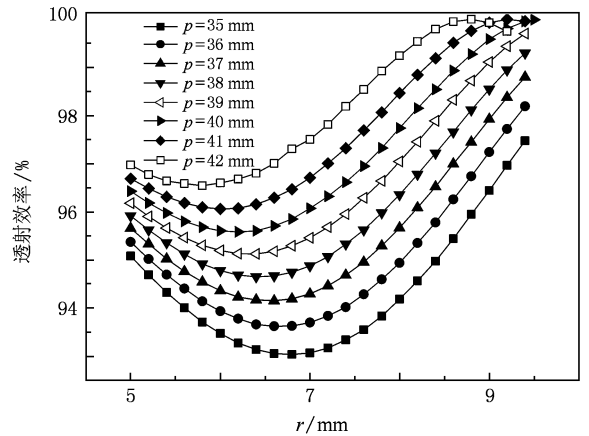


图 7 圆柱半径 r 和周期 p 对 X 波段微波透射效率的影响

对其进行了低功率和高功率实验研究。实验在微波暗室中进行,以消除周围环境产生的散射对微波测量的影响。

在低功率实验中,利用模式激励装置产生需要的 TM_{01} 模式,经过模式转换天线后转换成 TE_{11} 模式,然后由介质透镜转换成平面波前,辐射的微波照射到双工器平面,微波传输性能的测量利用矢量网络分析仪来进行,矢量网络分析仪的一端通过微波电缆接 TM_{01} 模式激励装置,另外一端接波导同轴转换器作为接收端。对 S/X 波段微波的反射和透射性能的测量分别在一个固定的平面上进行,以测定其辐射方向图,测量装置如图 8 所示。

双工器反射和透射方向图测定以后,对比放置双工器前天线的直接辐射方向图,可以计算得到双工器的反射效率和透射效率,结果如图 9 和图 10 所示。从图 9 和图 10 可以看出:在 $3.4\text{—}3.8 \text{ GHz}$ 的频率范围内,双工器对微波的反射效率在 96% —

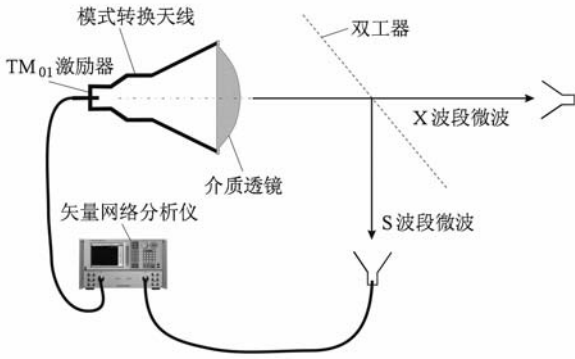


图 8 双工器冷测装置示意图

97% ;在 9.38—9.8 GHz 的频率范围内,双工器对微波的透射效率为 95%—97% . 随后,进行了隔离度的测量,与 S/X 波段微波的反射系数和透射系数的测量相反,在冷测实验中分别测量 S 波段微波的透射系数和 X 波段微波的反射系数,以此表征两路微波的隔离度. 根据实验研究,S/X 波段微波主瓣范围内的隔离度达到 25 dB 以上.

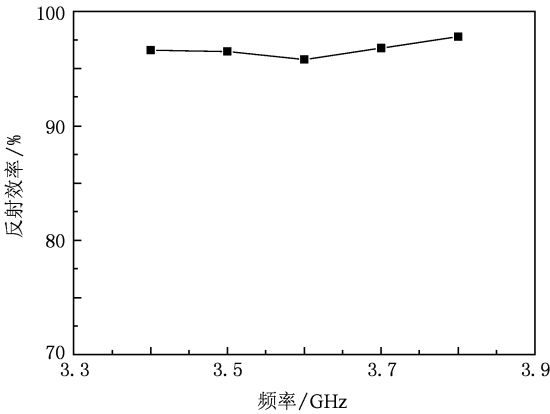


图 9 S 波段微波反射效率

为了测定双工器引起的交叉极化水平,首先对天线的交叉极化进行了测量. 测量时将波导-同轴转换器旋转 90°,以测量与主极化方向垂直的交叉极化耦合度. 实验研究发现,天线的交叉极化水平在 -25 dB 以下. 同理可以得到天线辐射的微波经双工器反射或者透射后的交叉极化水平. 经实验测量,对 S/X 波段微波进行反射和透射时,测量得到的交叉极化水平在 -25 dB 以下,与天线测量结果比较无明显变化. 据此推断,双工器引起的交叉极化水平在 -25 dB 以下.

在自建的加速器上进行了双工器的高功率实验研究,通过测量不同位置的功率密度来获得高功

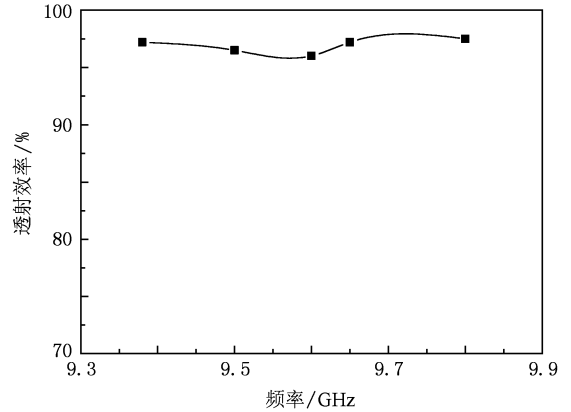


图 10 X 波段微波透射效率

率辐射条件下双工器的反射和透射方向图. 由于仪器和测量装置的限制,高功率微波方向图的测定一般在主瓣附近的角度上进行测量. 图 11 和图 12 示出了实验测得的双工器在 S/X 波段 1.5 GW 功率照射条件下的反射方向图和透射方向图. 从图 11 和图 12 可以看出,所测得的高功率辐射方向图与冷测实验的结果符合较好,放置双工器前后的 S/X 波段高

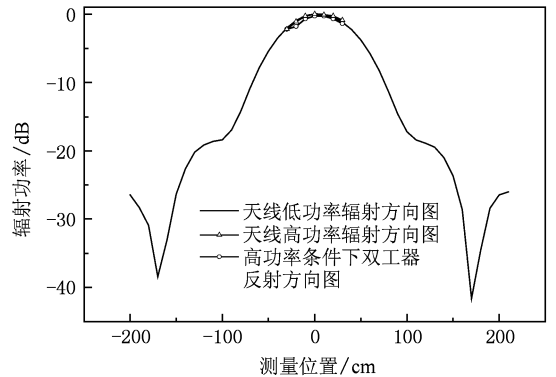


图 11 S 波段高功率微波热测和冷测方向图对比

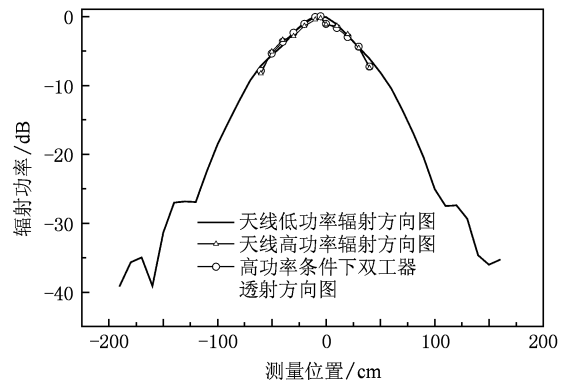


图 12 X 波段高功率微波热测和冷测方向图对比

功率微波的辐射方向图无较大变化。

除了对放置双工器前后的功率幅值进行了对比之外,还对接收的微波脉冲宽度进行了对比。研究发现,相同电脉冲条件下,放置双工器前后反射和透射的微波脉冲宽度无明显变化,为 90—100 ns。

4. 结 论

针对高功率微波日益增长的应用需求,本文设

计了一种高功率微波空间滤波器,该空间滤波器具有高效率、高隔离度、高功率容量、低交叉极化水平等特点。冷测实验研究发现,该双工器对 S 波段微波的反射效率达到 96%,该空间滤波器对 X 波段微波的透射效率达到 97%,隔离度分别达到 25 dB 以上,交叉耦合度在 -25 dB 以下;S/X 波段各自注入 1.5 GW 的高功率微波,脉冲宽度为 100 ns 的条件下,放置双工器后没有发现明显的微波脉冲缩短现象。

-
- [1] Fan Y W, Zhong H H, Li Z Q, Shu T, Yang H W, Wang Y, Luo L, Zhao Y S 2008 *Chin. Phys. B* **17** 1804
 - [2] Wang D, Chen D B, Fan Z K, Deng J K 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 4875 (in Chinese) [王冬、陈代兵、樊植开、邓景康 2008 物理学报 **57** 4875]
 - [3] Liao C, Liu D G, Liu S G 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 6709 (in Chinese) [廖臣、刘大刚、刘盛纲 2009 物理学报 **58** 6709]
 - [4] Fan Y W, Zhong H H, Yang H W, Li Z Q, Shu T, Zhang J, Wang Y, Luo L 2008 *J. Appl. Phys.* **103** 123301
 - [5] Wang D, Chen D B, Qin F, Fan Z K 2009 *Chin. Phys. B* **18** 4282
 - [6] Lu Z G, Gong Y B, Wei Y Y, Xu J, Gao P, Wang W X 2009 *Chin. Phys. B* **18** 2447
 - [7] Fu W J, Yan Y 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 7100 (in Chinese) [傅文杰、鄢扬 2007 物理学报 **56** 7100]
 - [8] Chen D B, Wang D, Fan Z K, Meng F B, An H S, Gong H T, Qin F 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 4548 (in Chinese) [陈代兵、王冬、范植开、孟凡宝、安海狮、龚海涛、秦奋 2009 物理学报 **59** 4548]
 - [9] Li G L, Yuan C W, Zhang J Y, Shu T, Zhang J 2008 *Laser and Particle Beams* **26** 371
 - [10] Fan Y W, Zhong H H, Li Z Q, Shu T, Yang H W, Zhou H, Yuan C W, Zhou W H, Luo L 2008 *Phys. Plasmas* **15** 083102
 - [11] Li G L, Shu T, Yuan C W, Zhang J, Jin Z X, Yang J H 2010 *Phys. Plasmas* **17** 033301
 - [12] Li G L, Shu T, Yuan C W, Zhu J, Liu J, Wang B, Zhang J 2010 *Laser and Particle Beams* **28** 35
 - [13] Levine J, Aiello N, Benford J 1990 *Proc. SPIE* **60** 1226
 - [14] Li G L, Shu T, Yuan C W 2007 *High Power Laser and Particle Beams* **19** 667 (in Chinese) [李国林、舒挺、袁成卫 2007 强激光与粒子束 **19** 667]
 - [15] Besso P, Bozzi M, Perregini L, Drioli L S, Nickerson W 2003 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **51** 388
 - [16] Imbriale W A, Esquivel M S, Manshadi F 1998 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **46** 1790
 - [17] Yasumoto K 2006 *Electromagnetic Theory and Applications for Photonic Crystals* (New York: Taylor & Francis Group) p227

Preliminary investigation on the design and experiment of a spatial filter for dual band high power microwave

Li Guo-Lin[†] Shu Ting Yuan Cheng-Wei Zhang Jun Jin Zhen-Xing

Yang Jian-Hua Zhong Hui-Huang Yang Jie Wu Da-Peng

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

(Received 25 January 2010; revised manuscript received 9 July 2010)

Abstract

A spatial filter/diplexer for gigawatt level high power microwave is theoretically and experimentally investigated in this paper. The spatial filter consists of several cylindrical rods which are located in the near field of the applied radiating antenna. The S/X dual band microwaves are reflected and transmitted by the spatial filter in the same propagation directions. In the low power experiments, the transmitted and the reflected patterns are very close to that of the applied antenna. The measured reflection and transmission efficiencies, calculated from the power densities in the far-field region, are about 96% and 97% respectively. In addition, the spatial filter has the isolation level higher than 25 dB and the cross polar level much lower than -25 dB. Under the illumination by S/X band high power microwave with a pulse magnitude of about 1.5 GW and duration of about 100 ns, no microwave breakdown is observed.

Keywords: high power microwave, coupling output, spatial filter, diplexer

PACC: 4280B, 3220D, 5270G

[†] E-mail: nudt-liguolin@hotmail.com