

文章编号: 1001-4322(1999)06-0729-04

# 高功率微波场磁光传感技术研究

孟 洲, 胡永明, 钱宝良, 陈 哲, 刘金亮, 曹 动, 倪 明, 周津娟

(国防科学技术大学应用物理系, 湖南长沙 410073)

**摘 要:** 介绍一种利用磁光晶体记录特性进行高功率微波场矢量测量的传感技术。用这种测量技术对返波管振荡器微波场的多点阵列测试表明, 该传感系统对被测场无影响, 抗干扰能力强, 空间分辨率为 0.001m, 可测出场的主要模式成份  $TM_{01}$ 、 $TE_{01}$  和  $TE_{11}$ , 以及各成份的场强和功率, 对总功率的估算值与喇叭耦合测量结果有较好的一致性。

**关键词:** 高功率微波场; 磁光传感; 磁场强度; 模式; 功率

**中图分类号:** TN24 **文献标识码:** A

近年来, 随着高功率微波研究工作的不断深入, 对其诊断技术提出了更高的要求。特别是高功率微波场的测试, 它是诸多诊断技术中难度较大且亟待解决的问题。常用的探针方法<sup>[1,2]</sup>, 对被测微波场有影响, 抗干扰能力差; 热敏纸、氦管阵列<sup>[3,4]</sup>等方法只能进行场的强度分布测试, 不能获得场矢量分布的重要信息。本文介绍的磁光传感方法抗干扰能力强, 对被测场无扰动, 能以优于 0.001m 的空间分辨率得到场中任意点上任意方向的磁场分量, 通过多点阵列测量, 可获得高功率微波磁场矢量分布的完整信息, 为发展场的模式诊断、功率测量等技术奠定了基础。

## 1 磁光传感原理及系统结构

高功率微波场磁光传感器是利用 In-BiCaVIG 晶体的磁光记录特性实现磁场测量的。实验证明, 该晶体对高功率微波无高频响应, 但在微波脉冲作用后, 晶体的旋光角将发生变化, 其大小与晶体通光方向上的磁场峰值成正比, 且旋光状态可长时间保留, 直至用静态场擦除。因此, 该晶体能方便地用于高功率微波矢量场的测量。设晶体磁致旋光角为  $\theta$ , 晶体通光方向上的磁场峰值为  $B$ , 则

$$\theta = \nu \cdot B \quad (1)$$

式中  $\nu$  是晶体的磁光灵敏度。

多点阵列式磁光传感系统由磁光传感偏振自动测试装置和传感头两部分构成。测试装置如图 1 所示。由半导体激光器 LD 发出波长为

1.3  $\mu\text{m}$  的激光经光纤偏振器  $P_1$  起偏后被自聚焦透镜  $S$  准直入射到磁光晶体  $C$  上, 再通过检

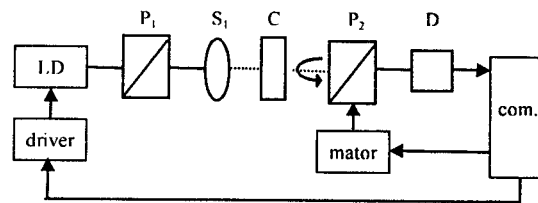


Fig. 1 Schematic of automatic measurement installation for magneto-optic sensor polarization

图 1 磁光传感偏振自动测试装置示意图

\* 国家 863 激光技术青年基金资助项目  
1999 年 1 月 4 日收到原稿, 1999 年 8 月 29 日收到修改稿。  
孟 洲, 女, 1968 年 6 月出生, 讲师

偏器格兰·泰勒棱镜  $P_2$  和探测器 D 检测从 C 输出的光的偏振面。为消除半导体激光器功率起伏和光强耦合变化对测量结果的影响,采用旋转  $P_2$ , 测量使探测功率达到极小值时的消光角  $\theta$  的偏振测试方法来检测磁致旋光角的大小。此偏振测试系统中入射到 C 上的偏振光的光束直径约 1mm, 晶体的安放位置精确定位, 误差小于 0.1mm, 在系统中测不到由于晶体位置的微小偏差造成的磁致旋光角的变化。为实现高精度和便于多点阵列测试, 装置用计算机控制高精度步进电机带动  $P_2$  自动旋转, 其灵敏度可达  $0.225^\circ$ 。装置还利用计算机通过驱动电路对光源进行调制, 以便在信号处理中使用数字滤波和自相关等方法抑制噪声。系统的偏振角测量精度优于  $1^\circ$ 。传感头是一块载有多块大小为  $2\text{mm} \times 2\text{mm} \times 0.7\text{mm}$  的 In-BiCaVIG 晶体的有机玻璃薄板。测试微波场时, 传感头紧贴在微波源漂移管的端板上。理论上, 玻璃板上晶体布得越多, 越能准确完整地测量微波矢量场的分布。而实际测试时, 需据被测微波场的特征确定晶体布点数和位置。

实验时, 先将编有序号的晶体插入测试装置光路中, 用永磁体对晶体初始化并测量线偏振光通过初始化晶体的偏振面位置  $\theta_0$ ; 然后, 将晶体定位在有机玻璃板上, 传感头置于高功率微波场中, 待高功率微波脉冲作用后, 再将传感头取出, 晶体依次放入测试系统中测量晶体上输出光的偏振面位置  $\theta_1$ ,  $\Delta\theta = \theta_1 - \theta_0$  即为高功率微波脉冲作用下晶体中磁致旋光角的变化。由式(1)可推算出各晶体所在位置处微波场的大小和方向。测试光路中磁光晶体的偏振光束直径仅为 1mm, 该磁光传感方法的空间分辨率为 1mm。

## 2 传感系统的标定和实验设计

磁光传感系统的标定实际上就是晶体灵敏度  $\nu$  值的确定。根据 In-BiCaVIG 晶体的磁旋光记录特性的物理机制, 晶体磁旋光状态变化的最大值与磁场峰值有关, 与中间过程无关。由此可用静磁场精确地测定磁场强度与晶体磁旋光记录状态变化的关系, 即标定晶体的  $\nu$  值。针对目前我国高功率微波装置的发展水平, 待测微波场功率在  $10\text{MW} \sim 1\text{GW}$  范围, 根据微波场理论可推算出磁场强度  $B$  在  $10^{-3}\text{T} \sim 10^{-2}\text{T}$  量级。对传感系统的标定结果如图 2 所示。由图可知, 晶体灵敏度  $\nu$  为  $0.5/10^{-4}\text{T}$ , 由晶体磁滞引起的误差小于 5%。

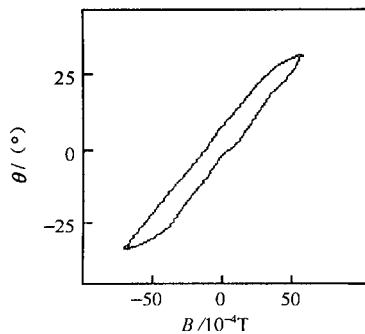


Fig. 2 The magneto-optic characteristics curve of crystal

图 2 晶体磁光特性曲线

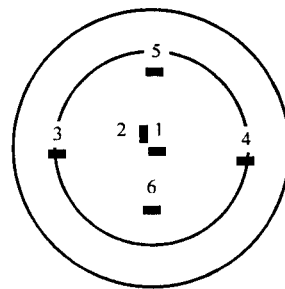


Fig. 3 Probes array locations for magnetic field

图 3 磁场阵列测试探头位置

该磁光传感系统已用在返波管振荡器、虚阴极等高功率微波源的微波场测试中, 对于不同微波场传感头的设计不一样。本文介绍用于返波管振荡器微波场测试的传感头。理论分析得

知该微波场以  $TM_{01}$  模为主模,可能还含有  $TE_{01}$  和  $TE_{11}$  模<sup>[5]</sup>。传感头在这三个模式的特征点上布有晶体,以便于重构出微波场的矢量分布,如图 3 所示。晶体所测磁场方向为通光方向,即与其端面垂直。设  $R$  是漂移管半径,根据微波场模式理论<sup>[6]</sup>,漂移管横截面上  $TM_{01}$  模的磁场  $H_r=0, H_\phi$  的极值在  $r=0.77R$  处; $TE_{01}$  模的  $H_\phi=0, H_r$  的极值位于  $r=0.48R$  处; $TE_{11}$  模的  $H_\phi$  和  $H_r$  都不为零,  $H_r$  的极值在  $r=0$  处,极化方向不定,它与装置的结构和运行状态有关。因此,传感头在  $r=0$  处的两垂直方向设置有 1、2 两块晶体,分别测两个互相垂直方向的磁场,用矢量加法可得到该点处场的大小和方向。理论上,  $TM_{01}$  和  $TE_{01}$  模在该点处场强为 0,所以可认为该点处的磁场就是  $TE_{11}$  模的场,据微波场理论可构造出端板上  $TE_{11}$  模场分布。3、4 两块晶体测量它们所在位置  $r=0.77R$  处的轴向磁场,去除  $TE_{11}$  模在这两点的  $H_\phi$ ,就可得到  $TM_{01}$  模磁场的极值。同样,5、6 两块晶体用于测量它们所在位置  $r=0.48R$  处的径向磁场,去除  $TE_{11}$  模在这两点的  $H_r$ ,就可得到  $TE_{01}$  模磁场的极值。所以用微波场理论分析这六块晶体的磁场测量值,可较完整地重构出返波管微波磁场分布。根据微波场理论可以推算出这三种模式的磁场与功率的关系

$$\begin{aligned}
 P_{TM_{01}} &\approx \frac{\pi c^3 R^2 J_1^2(2.4)}{2 J_1^2(1.84)} \epsilon_0 |B_\phi|_{\max}^2 \\
 P_{TE_{01}} &\approx \frac{\pi c^3 R^2 J_0^2(3.83)}{2 J_1^2(1.84)} \epsilon_0 |B_r|_{\max}^2 \\
 P_{TE_{11}} &\approx \frac{\pi R^2 c^3 \epsilon_0}{2} \left(1 - \frac{1}{1.84^2}\right) \frac{J_1^2(1.84)}{J_1^2(0)} |B_r|_{\max}^2
 \end{aligned} \tag{2}$$

式中  $c$  为真空中光速;  $\epsilon_0$  是真空介电常数;  $J_0$  和  $J_1$  分别为零阶和一阶贝塞尔函数。由(2)式可推算返波管激发的三种模式的功率绝对值。

### 3 实验结果及讨论

在进行微波矢量场测量前,对该传感系统的可靠性进行了实验。图 3 所示的传感头中晶体 1 和 2、3 和 4、5 和 6 分别重叠在一起测量微波场中同一点同一方向的磁场。多次实验表明,在系统测试误差范围内,每两块晶体所测磁场值相等。因此,晶体响应的一致性和系统测试的可靠性较好。

对返波管振荡器微波场的测试结果如表 1 所示。表中  $B_1$  是晶体 1、3 和 5 所测磁场强度,  $B_2$  是修正后  $TE_{11}$ 、 $TM_{01}$  和  $TE_{01}$  模的场强极值,  $P_1$  是据式(2)和微波场强  $B_2$  推算出的微波功率。表中所列  $B_2$  值不仅分别表明  $TE_{11}$  模、 $TM_{01}$  模和  $TE_{01}$  模的存在,而且可以进一步从  $B_2$  推算出三种模式功率的相对激发强度约为 3 : 2 : 1,此结果清楚地表明  $TM_{01}$  模为主导模,这与理论分析结果<sup>[5]</sup>完全一致。

表 1

crystal	$B_1/10^{-4}T$	$B_2/10^{-4}T$	$P_1/MW$
1,2	2	35	5.7
3	51	51	16
5	47	47	9.3

在功率绝对值测量方面,用喇叭耦合测得的功率  $P_2=40MW$ ,由上述场测量值估算出三种模式的功率分别为 16MW、9.3MW 和 5.7MW,三种模式总功率是 31MW。这两种方法测

量结果的差值已在耦合器测量误差范围内。

在不同功率下,通过磁光传感系统测得场估算的功率值与喇叭耦合功率测量结果见图 4,从中可看出两者在量的变化上具有较好的一致性。

## 5 结 论

高功率微波场磁光传感技术利用磁光晶体 In-BiCaVIG 的记录特性对高功率微波场中任意点上任意方向的磁场分量进行直接测量,空间分辨率达 1mm,对被测场无影响,抗干扰能力强。对返波管振荡器微波场的多点阵列测试表明,该系统通过对微波场特征点处磁场的测量,可重构出微波场的完整分布信息,给出场主要模式成份  $TM_{01}$ 、 $TE_{01}$  和  $TE_{11}$ ,以及各成份的场强和功率,对总功率的估算值与喇叭耦合测量结果在量的变化上有良好的一致性。

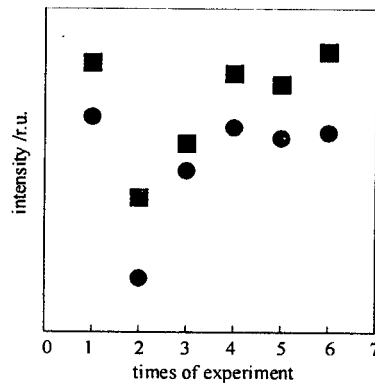


Fig. 4 Comparison between estimations of field power (●) and horn coupler measurement results (■)

图 4 场功率估算值(●)与喇叭耦合功率测量结果(■)比较

## 参 考 文 献

- 1 凌根深,李传庐. 虚阴极高功率微波功率和模式的同时测量. 国防科技大学学报,1995,(17)增刊
- 2 刘国治,刘静月,黄文华. 一种简单的高功率微波模式和功率诊断方法. 强激光与粒子束,1998,10(4):606~610
- 3 王文祥,徐梅生,余国芬. 波导系统模式的分析与鉴别,真空电子技术,1993,(1):1~6
- 4 Bratman V L, et al. Powerful millimeter-wave generators based on the stimulated cerenkov radiation of relativistic electron Beams. *Int J of infrared and Millimeter Waves*,1984,5(9):1311~1332
- 5 Qian Bao-Liang, Li Chuan-Lu, and Liu Yong-gui. Backward-and traveling-wave tubes with dielectric-lined rippled-wall waveguides. *Physical Review E*, 1996, 53(2):1864~1870
- 6 廖承恩. 微波技术基础. 北京:国防工业出版社,1987. 97~106

# TECHNICAL STUDY OF MAGNETO-OPTIC SENSOR FOR HIGH POWER MICROWAVE FIELD

MENG Zhou, HU Yong-ming, QIAN Bao-liang, CHEN Zhe, LIU Jin-liang,  
CAO Dong, NI Ming, ZHOU Jin-juan

*Department of Applied Physics, National University of Defence Technology, Changsha, 410073*

**ABSTRACT** The sensor technology for high power microwave vector field by using recording characteristics of magneto-optic crystal is described in this paper. The multipoint array measurements on the microwave field of the cacinotron oscillator indicate that the sensor system has no effect on the measured field and has an anti-interference ability, its spatial resolution is 1mm. The sensor can measure the field's main modes  $TM_{01}$ ,  $TE_{01}$  and  $TE_{11}$ , and the field intensities and powers of these modes. The estimations of the total power agree well with the results which are measured by horn coupler.

**KEY WORDS** high power microwave field; magneto-optic sensor; magnetic field intensity; mode; power