

# 带双负载环形天线的集成光波导磁场探测器

陈福深, 陶厚超, 孙 豹

(电子科技大学宽带光纤传输与通信网技术教育部重点实验室 成都 610054)

**【摘要】**针对电磁兼容测试中对磁场探测的需要, 提出一种新型的集成光学磁场探测器, 它的探测头是由LiNbO<sub>3</sub>光波导调制器和双负载环天线构成的。由于电磁感应和电光效应, 通过探测输出光强便可得知磁场的相关信息。与传统的磁场探测器相比, 它具有体积小, 对被测场干扰小的特点, 并且能够有效抑制电场的影响, 提高了探测准确性。通过设计探测头, 得到了满足探测要求的光波导磁场探测器, 并对该结构进行了仿真, 仿真结果与此前的分析吻合, 证实了探测器的设计是合理的。

**关键词** 电磁场; 电光效应; 环形天线; 光波导调制器; 探测器  
**中图分类号** TN252 **文献标识码** A

## Integrated Optical Waveguide Magnetic Field Probe with a Doubly-Loaded Loop Antenna Element

CHEN Fu-shen, TAO Hou-chao, and SUN Bao

(Key Laboratory of Ministry of Education for Broadband Optical Fiber Transmission & Communication Networks,  
University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 610054)

**Abstract** A new type of integrated optical waveguide magnetic field probe was proposed for electromagnetic compatibility test. The probe head is constituted with a LiNbO<sub>3</sub> optical waveguide modulator and a doubly-loaded loop antenna element. The magnetic field information can be obtained by detecting the output optical intensity. Compared with the traditional magnetic field probes, it has lower disturbance of measured field, and can suppress the electrical influence effectively. Simulation result is consistent with the theoretical analysis.

**Key words** electromagnetic field; electro-optic effect; loop antenna; optical waveguide modulator; probe

近年来, 电磁场探测器受到越来越广泛的关注, 电磁场测量已经成为各种科学技术领域内的重要组成部分。由于电场探测相对于磁场探测要容易得多, 并且可以根据麦克斯韦方程, 通过电场计算出磁场( $E/H=\eta$ ), 所以大多数情况, 人们没有必要直接探测磁场, 但是电磁近场区是一个例外。

近场区通常指靠近天线或其他辐射体的区域。在这个区域内, 电场和磁场不具备完全的平面波特性, 点和点之间的差异非常大。近场区又进一步分为无功近场区(reactive near-field region)和辐射近场区(radiating near-field region)<sup>[1]</sup>。无功近场区是最接近辐射体的区域, 它包含大部分或者几乎所有的储存能量。在辐射近场区, 相对于无功场, 辐射场占

支配地位, 但是它仍不具备平面波特性。在距离场源 $d^2/\lambda$ 的近场区( $d$ 是场源有效孔径的最大尺寸,  $\lambda$ 是电磁辐射的波长), 由于电场和磁场的关系复杂, 不能通过波阻抗公式简单计算得到, 所以需要分别测量电场和磁场<sup>[2]</sup>。在磁场测量中, 减少对被测场的干扰, 抑制电场的影响成为需要重点研究的两个问题。现有的光学磁场探测器很多都是基于磁光效应制成的<sup>[3-5]</sup>, 而本文则提出了一种新型的利用环形天线<sup>[6-7]</sup>和光波导调制器作为探测头的磁场传感器。

### 1 探测器结构与计算

带双负载环形天线<sup>[8-10]</sup>的集成光波导磁场探测器结构如图1所示, 在光波导调制器上集成了一环形

天线作为探测头,探测头是一个正方形的金属环<sup>[11]</sup>,在两条相对的边上有类似平板电容的电极,环和电极的厚度均为 $w$ ,具体尺寸如图2a所示。根据法拉第电磁感应定律,当穿过探测头的磁通量发生变化时,在两电极间会产生感应电压:

$$V_H(\omega, t) = -\frac{d}{dt}\varphi(\omega, t) = -\omega\varphi(\omega, t) = -\omega\mu(a-b)^2 H(\omega, t) \quad (1)$$

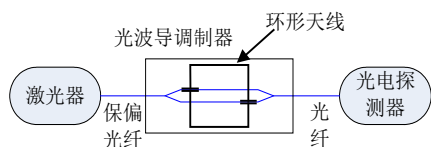


图1 集成光波导磁场探测系统示意图

式中  $\omega$  为磁场的角频率;  $\varphi$  为穿过探测头的磁通量;  $\mu$  为磁导率;  $H$  为磁场强度。探测头可近似为如图2b所示的等效电路,该电路是一个LC谐振回路,它存在一个很明显的谐振峰,所以为了提高探测灵敏度,谐振峰应在被测频率范围内。

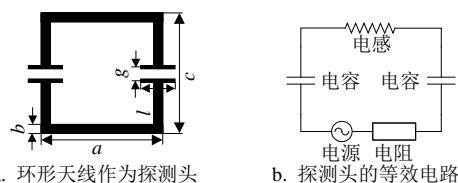


图2 探测头结构及其等效电路

### 1.1 消除电场对磁场探测的影响

采用双负载探测头,是为了抑制电场感生的电压对测量结果的影响,如图3a所示。感应电压 $V$ 由电场 $E$ 和磁场 $H$ 共同产生,即 $V=V_H+V_E$ 。在单负载情况下,由于电场的影响,无法得到准确的磁场信息,因此,采用双负载探测头。根据光波导调制器的调制电压和输出光强的关系,使用单、双负载探测头的磁场探测器的输出光强表达式分别为:

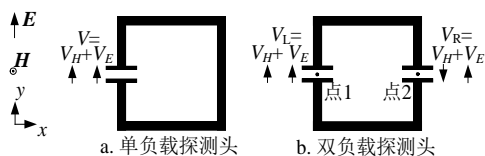


图3 单负载探头和双负载探头的比较

$$I_{out} = \frac{1}{2} I_{in} (1 + \cos(\Delta\theta)) = \frac{1}{2} I_{in} \left[ 1 + \cos\left(\frac{2\pi l}{\lambda g} n^3 \gamma V\right) \right] = \frac{1}{2} I_{in} \left[ 1 + \cos\left(\frac{2\pi l}{\lambda g} n^3 \gamma (V_H + V_E)\right) \right] \quad (2)$$

$$I_{out} = \frac{1}{2} I_{in} (1 + \cos(\Delta\theta)) = \frac{1}{2} I_{in} \left[ 1 + \cos\left(\frac{2\pi l}{\lambda g} n^3 \gamma (V_L - V_R)\right) \right] = \frac{1}{2} I_{in} \left[ 1 + \cos\left(\frac{2\pi l}{\lambda g} n^3 \gamma ((V_H + V_E) - (-V_H + V_E))\right) \right] = \frac{1}{2} I_{in} \left[ 1 + \cos\left(\frac{4\pi l}{\lambda g} n^3 \gamma V_H\right) \right] \quad (3)$$

式中  $I_{out}$  为光波导调制器输出光强;  $I_{in}$  为输入光强;  $\Delta\theta$  为两波导臂的相位差;  $l$  为电光相互作用长度,近似为电容长度;  $g$  为电极间距,即电容间距;  $V_L$ 、 $V_R$  分别为图3中左右两块极板间的感应电压;  $\lambda$  为激光器输出光波长;  $\gamma$  为电光系数。可见,在式(3)的结果中,输出光强只与探测器结构和被测磁场有关,而与电场无关。

### 1.2 环形天线参数对谐振频率的影响

在图2中,对于厚度和宽度相等的正方形环,电感 $L$ 和电容 $C$ 分别为:

$$L = \frac{\mu_0}{\pi} (-2(a-b)\lg((1+\sqrt{2})(a-b)) + 2(a-b)\lg(8(a-b)^2/b) + 2\sqrt{2}(a-b) - \frac{7}{2}(a-b)) \quad (4)$$

$$C = \varepsilon\varepsilon_0 lb/2g \quad (5)$$

谐振频率为:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (6)$$

在电极间的感应电压为:

$$V = \frac{2\mu_0(a-b)^2\pi f}{\left|2\pi fL - \frac{1}{2\pi fC}\right|} H \quad (7)$$

式中  $H$  为被测磁场强度。

由铌酸锂光波导调制器的实际制作尺寸要求<sup>[12]</sup>,本文设计了两种尺寸的光波导磁场探测器,如表1所示。

表1 Probe A 和 Probe B 的尺寸设计(单位: mm)

	$a$	$b$	$c$	$l$	$g$	$w$
Probe A	2	0.01	2	1	0.006	0.01
Probe B	10	0.02	6	3	0.006	0.01

## 2 仿真结果

以铌酸锂基底平面法线方向为 $z$ 轴,光束传播方

向为x轴, 建立坐标系, 如图4所示。当磁场分量为26.5 mA/m的平面波入射时, Probe A和Probe B的E-f曲线分别如图4和图5所示, 图中的E<sub>1</sub>、E<sub>2</sub>分别为图3中点1和点2处沿y方向的电场强度。

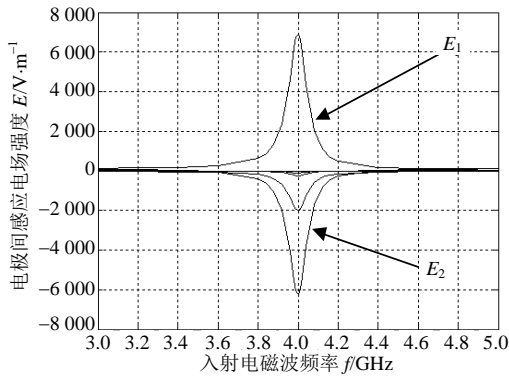


图4 Probe A的电极间电场强度与入射电磁波频率的关系

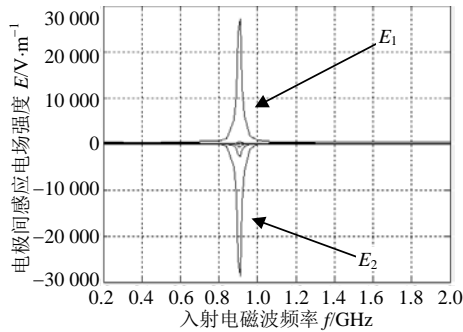


图5 Probe B的电极间电场强度与入射电磁波频率的关系

可见, 在谐振频率处, 环形天线对磁场探测有很好的响应。E<sub>1</sub>、E<sub>2</sub>的符号相反, 绝对值基本相等, 表明本文结构有效地抑制了入射波的电场分量对磁场探测的影响。以Probe B为例, 结合式(3), 可得到输出光强随频率变化的关系曲线, 如图6所示。

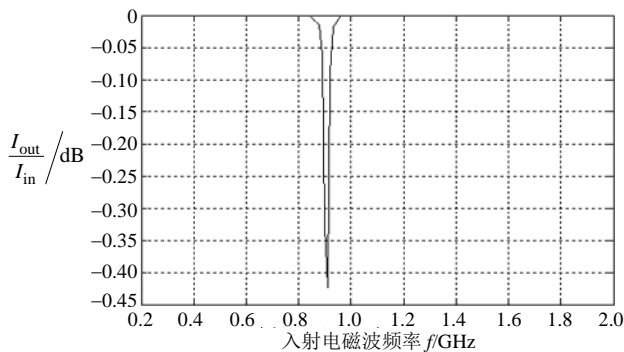


图6 Probe B的输出光功率与入射电磁波频率的关系

### 3 结 论

通过采用双负载环形天线与M-Z光波导调制器相结合的结构, 本文提出了一种新型的磁场传感器,

从理论和仿真上, 证实了利用该传感器探测磁场的可行性, 并且它对入射波的电场分量有较好的抑制。最后得到了入射波频率与输出光强的关系。

### 参 考 文 献

- [1] PASSARO V M N, DELL'OLIO F, LEONARDIS F D. Electromagnetic field photonic sensors[J]. Progress in Quantum Electronics, 2006, 30(2-3): 45-73.
- [2] LAI Sheng-jian, WANG Bing-zhong. Progress of expert systems in electromagnetic Engineering[J]. Journal of Electronic Science and Technology of China, 2005, 3(4):328-333.
- [3] DEETER M N, DAY G W, WOLFE R, et al. Magnet-optic magnetic field sensors based on uniaxial iron garnet films in optical waveguide geometry[J]. IEEE Trans Magn, 1993, 29(6): 3402-3404.
- [4] 王江平, 刘 杰, 苏 洋, 等. 一种基于光纤传感脉冲磁场传感器的研究[J]. 传感器世界, 2005, 11(12): 25-28. WANG Jiang-ping, LIU Jie, SU Yang. Study on a pulse electromagnetic field sensor based on fiber optical sensing[J]. Sensor World, 2005, 11(12): 25-28.
- [5] 王江平, 苏 洋, 李玉权. Faraday效应的磁场传感器光偏振态的演化[J]. 北京邮电大学学报, 2007, 30(5): 58-62. WANG Jiang-ping, SU Yang, LI Yu-quan. Evolution of output light sop in pulsed magnetic field sensor based-on faraday effect[J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2007, 30(5): 58-62.
- [6] KANDA M. Standard probes for electromagnetic field measurements[J]. IEEE Trans AP, 1993, 41(10): 1349-1364.
- [7] 张卫东, 崔 翔. 光纤瞬态磁场传感器的研究及其应用[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(1): 88-92. ZHANG Wei-dong, CUI Xiang. Development of an optical transient magnetic field sensor and its application [J]. Proceedings of the Chinese. 2003, 23(1): 88-92.
- [8] KANDA M. An electromagnetic near-field sensor for simultaneous electric- and magnetic-field measurements[J]. IEEE Trans EMC, 1984, 26(3): 102-110.
- [9] WHITESIDE H, KING R W P. The loop antenna as a probe[J]. IEEE Trans, AP, 1964, 12(3): 291-297.
- [10] DYSON J. Measurement of near fields of antennas and scatters[J]. IEEE Trans AP, 2004, 21(4): 446-460.
- [11] SUZUKI E, ARAKAWA S, OTA H, et al. Optical magnetic field probe with a loop antenna element doubly loaded with electrooptic crystals[J]. IEEE Trans EMC, 2004, 46(4): 641-647.
- [12] 孙 豹, 陈福深, 杨拥军. 分段电极集成光波导电场传感器的研究[J]. 电子科技大学学报, 2005, 34(6): 898-90. SUN Bao, CHEN Fu-shen, YANG Yong-jun. Research of integrated optical waveguide e-field sensor with segment electrodes[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2005, 34(6): 898-90.