

文章编号: 1001-3806(2011)05-0688-04

## 集成光波导电场传感器分段电极频率响应分析

胡哲峰, 陈福深, 孙豹, 陈实

(电子科技大学 通信与信息工程学院, 成都 611731)

**摘要:** 为了研究集成光波导电场传感器分段电极的频率响应特性, 采用时域有限差分法进行了数值计算, 并在吉赫兹横电磁波室中对实际制作器件的频率响应特性进行了测试。结果表明, 当分段数固定在10、电极总长度从42mm减小到12mm时, 频率响应带宽从2.68GHz增加到5.91GHz; 而当电极总长度保持为42mm、分段数从10增加到30时, 频率响应带宽从2.68GHz减小到2.51GHz, 变化不大。实际测试的结果与仿真结果大致相符。

**关键词:** 集成光学; 光波导; 电场传感器; 分段电极; 频率响应; 有限时域差分

中图分类号: TP212.1 文献标识码: A doi:10.3969/j.issn.1001-3806.2011.05.030

### Analysis of frequency response of segment electrodes in integrated optical waveguide electric field sensors

HU Zhe-feng, CHEN Fu-shen, SUN Bao, CHEN Shi

(School of Communication and Information Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China)

**Abstract:** In order to study the frequency response characteristics of segment electrodes in an integrated optical waveguide electric field sensor, they were calculated by means of finite difference time domain method, and were measured in the actual gigahertz transverse electromagnetic wave (GTEM) cell. The results show that, when the segments number is 10 and the total length of electrodes decreases from 42mm to 12mm, the responding frequency bandwidth increases from 2.68GHz to 5.91GHz; when the total length of electrodes is 42mm and the segment number increases from 10 to 30, the bandwidth of responding frequency decreases slightly from 2.68GHz to 2.51GHz. The simulated results are consistent with measurement results.

**Key words:** integrated optics; optical waveguide; electric field sensor; segment electrodes; frequency response; finite difference time domain

### 引言

随着电子技术的迅速发展, 电子设备的复杂度越来越大、集成度越来越高, 基于分立器件的组合的传统电场传感器已难以满足新的应用需要。利用铌酸锂 ( $\text{LiNbO}_3$ ) 晶体中的电光效应研制的新型集成光波导传感器, 由于其结构简单、尺寸小、带宽大、对被测目标干扰小等优点近来备受瞩目<sup>[1-4]</sup>。

目前, 集成光波导传感器的电极结构主要有偶极子天线电极<sup>[1-2]</sup>和分段电极<sup>[3-4]</sup>两种。分段电极的电场传感器由于抛掉了尺寸较长的偶极子天线, 将两端电极的长度延长而构成了一种天线和分段电极结合在一起的结构, 从而利用较小的尺寸实现了阻抗的匹配,

因而可以极大地减小器件对被测目标的干扰并提高频率响应范围。本文中针对分段电极结构的频率响应进行了建模, 进而使用数值模拟的方法对分段电极的频率响应特性进行了仿真, 对结果进行了分析, 并通过实验测试了实际制作器件的频率响应特性。

### 1 分段电极传感器的工作原理

如图1所示, 分段电极电场传感器的光波导为常见的马赫-曾德尔 (Mach-Zehnder, M-Z) 干涉仪结构, 其工作波导为  $x$  切  $\text{LiNbO}_3$  晶体, 工作原理类似于 M-Z 电光调制器。由于 Pockels 效应的作用, 外加的待测电场会使晶体的折射率发生线性改变, 从而使得通过晶体的光场产生相应的相位变化, 进而在 M-Z 干涉仪的两臂引入一定的相位差, 再通过干涉效应使得被测

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (60771045); 国防预研基金资助项目 (9140A23060509DZ0227)

作者简介: 胡哲峰 (1980-), 男, 博士, 讲师, 现主要从事光电子集成器件和全光信号处理的研究。

E-mail: zfh@uestc.edu.cn

收稿日期: 2010-12-05; 收到修改稿日期: 2011-02-03

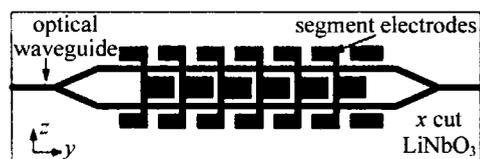


Fig. 1 Optical waveguide electric field sensor with segment electrodes

电场的变化反映到输出的光强信号上。通过检测输出光的强度,即可推算出相应的电场参量。

假设输入的光强为  $I_{in}$ , 经过传感器后输出的光强为  $I_{out}$ , 由 M-Z 调制器的特性可知:

$$I_{out} = \frac{1}{2} I_{in} \left[ 1 + \cos\left(\pi \frac{V}{V_{\pi}} + \Phi_0\right) \right] \quad (1)$$

式中,  $V$  是由天线接收到的待测电场加载在电极上所形成的分段电极之间的电压,  $V_{\pi}$  为传感器的半波电压,  $\Phi_0$  为初始相位偏置。由(1)式可知, 如果集成光波导电场传感器的结构和输入光强确定, 那么输出的光强仅随电极电压  $V$  变化。当把传感器置于待测电场中时, 只需对传感器的输入和输出光强进行测量, 即可求出待测电场加载在电极上的电压值。

## 2 分段电极频率响应的数值模型

### 2.1 模型的建立

时域有限差分 (finite difference time domain, FDTD) 方法是对时域麦克斯韦方程组的直接数值解法<sup>[5]</sup>。在电磁场的求解过程中, 它通过对电场分量与磁场分量进行空间和时间上的交替抽样, 使得在每一个电场分量周围有 4 个磁场分量, 每个磁场分量周围有 4 个电场分量, 这样便可将麦克斯韦旋度

方程组转化为差分方程组的形式, 然后, 通过在时间轴上的逐步推进来求得空间中的电磁场。这样, 再通过傅里叶变换就可以得到空间电磁场的频域解。由于 FDTD 方法是通过计算空间中一点的电场(或磁场), 而与周围的磁场(或电场)进行直接关联, 并将介质参量赋值给空间中每一个元胞的, 因而该方法在处理形状复杂的目标和非均匀介质的电磁散射问题时较大的优势。

Maxwell 方程组的微分形式为:

$$\begin{cases} \nabla \times \mathbf{H} = \varepsilon \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} + \sigma \mathbf{E} \\ \nabla \times \mathbf{E} = -\mu \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} + \sigma_m \mathbf{H} \\ \nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \\ \nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \end{cases} \quad (2)$$

式中,  $\mathbf{E}$  和  $\mathbf{H}$  分别为电场矢量和磁场矢量,  $\varepsilon$  和  $\mu$  分别是介质的介电常数和磁导率,  $\mathbf{B}$  和  $\mathbf{D}$  分别为磁感应强度矢量和电位移矢量,  $\rho$  为电荷体密度,  $t$  是时间变量,  $\sigma$  为电导率,  $\sigma_m$  为等效磁阻率。这里引进等效磁阻率的目的是为了使方程具有对称性<sup>[6]</sup>。对上式中电场的  $x$  分量和磁场的  $x$  分量进行离散化, 得到显式的差分方程为:

$$\begin{cases} E_x^{n+1}\left(i + \frac{1}{2}, j, k\right) = CA(m) \cdot E_x^n\left(i + \frac{1}{2}, j, k\right) + CB(m) \cdot \left[ \frac{H_z^{n+\frac{1}{2}}\left(i + \frac{1}{2}, j + \frac{1}{2}, k\right) - H_z^{n+\frac{1}{2}}\left(i + \frac{1}{2}, j - \frac{1}{2}, k\right)}{\Delta y} - \frac{H_y^{n+\frac{1}{2}}\left(i + \frac{1}{2}, j, k + \frac{1}{2}\right) - H_y^{n+\frac{1}{2}}\left(i + \frac{1}{2}, j, k - \frac{1}{2}\right)}{\Delta z} \right] \\ H_x^{n+\frac{1}{2}}\left(i, j + \frac{1}{2}, k + \frac{1}{2}\right) = CP(m) \cdot H_x^{n-\frac{1}{2}}\left(i, j + \frac{1}{2}, k + \frac{1}{2}\right) + CQ(m) \cdot \left[ \frac{E_z^n\left(i, j + \frac{1}{2}, k + \frac{1}{2}, k + \frac{1}{2}\right) - H_z^n\left(i, j, k + \frac{1}{2}\right)}{\Delta y} - \frac{E_y^n\left(i, j + \frac{1}{2}, k + 1\right) - E_y^n\left(i, j + \frac{1}{2}, k\right)}{\Delta z} \right] \end{cases} \quad (3)$$

式中,  $i, j, k$  为各方向上的分段指标,  $\Delta x, \Delta y$  和  $\Delta z$  为各方向的空间步长。同样,  $y$  和  $z$  方向上的电场和磁场分量也可得到与(3)式类似的形式。其中与时间步长相关的因子为:

$$\begin{cases} CA(m) = \frac{1 - \frac{\sigma(m)\Delta t}{2\varepsilon(m)}}{1 + \frac{\sigma(m)\Delta t}{2\varepsilon(m)}} \\ CB(m) = \frac{\frac{\Delta t}{\varepsilon(m)}}{1 + \frac{\sigma(m)\Delta t}{2\varepsilon(m)}} \\ CP(m) = \frac{1 - \frac{\sigma_m(m)\Delta t}{2\mu(m)}}{1 + \frac{\sigma_m(m)\Delta t}{2\mu(m)}} \\ CQ(m) = \frac{\frac{\Delta t}{2\mu(m)}}{1 + \frac{\sigma_m(m)\Delta t}{2\mu(m)}} \end{cases} \quad (4)$$

对电场和磁场进行一定的归一化处理, 即可使用上述差分方程组对电磁场进行时域上的推导求解了。

根据电磁场的波动方程, 得到 3 维空间中电磁场需要满足的柯西稳定性条件为<sup>[7]</sup>:

$$c\Delta t \leq \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{(\Delta x)^2} + \frac{1}{(\Delta y)^2} + \frac{1}{(\Delta z)^2}}} \quad (6)$$

式中,  $c$  为真空中的光速。

另外, 由于硬件存储容量的限制, 计算只能在有限的区域内进行。为了对开域的电磁过程进行准确地描述, 在计算区域的截断边界处就必须给出吸收边界条件。吸收边界从最初简单的插值边界, 到后来广泛采用的 Mur 吸收边界, 直至近几年出现的完全匹配层 (perfectly matched layer, PML) 吸收边界, 其吸收效果越来越好<sup>[8]</sup>。

使用 FDTD 方法来对电磁场进行求解时, 一般都假定各场分量的初始值为 0。当  $t > 0$  时, 在预定源存在的网格点处, 将被赋予源的场值。该源值会随着时间步长的增加而沿着网格空间传播, 并作用于被研究的媒质上, 从而造成散射、吸收等现象。这种场的建立、传播、散射或吸收等物理过程的描述需要相当长的时间才能达到稳定。而当源不存在时, 就只能得到网格各点上场的零解。因此, 源的正确设置是 FDTD 运算的必要条件之一。对于 3 维激励源的设置, 很多文献中都进行了细致的分析并提出了有效的操作方法<sup>[9-12]</sup>。

## 2.2 网格的划分

假定研究的集成光波导电场传感器的分段电极的总长度为  $L$ , 分段数为  $N$ , 其结构尺寸如图 2 所示。

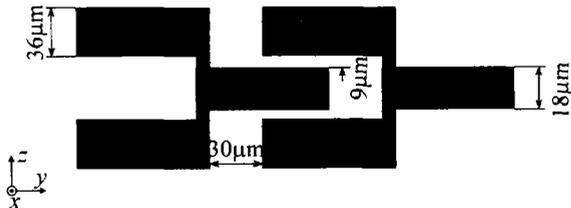


Fig. 2 Structure of segment electrodes

针对作者所考虑的集成光波导分段电极电场传感器的电极结构及 FDTD 方法的计算特点, 采用非均匀的网格划分方法对该电极结构进行了划分, 划分后的模型如图 3 所示。

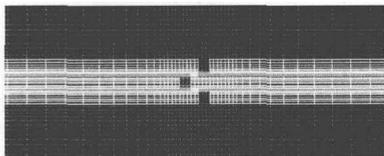


Fig. 3 Graded meshing to segment electrodes

## 3 数值模拟结果与分析

为了分析电极的频率响应特性, 设置入射电场为一宽频带的脉冲平面波, 其场强为 20V/m, 入射方向与 M-Z 调制器平面垂直, 极化方向为  $y$  方向。边界条

件则选取 PML 吸收边界, 且 PML 的层数设置为 7 层。

当分段数  $N = 10$  时, 改变分段电极的总长度, 得到分段电极中间段电极间  $z$  方向的电场频率响应曲线如图 4 所示。当  $L$  的取值分别为 42mm, 32mm, 22mm

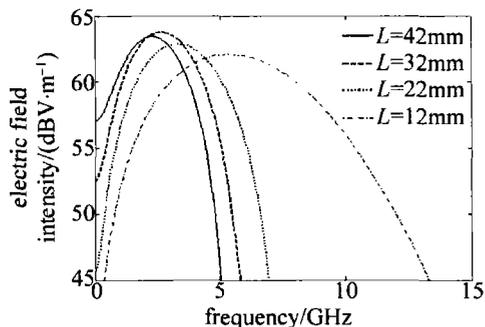


Fig. 4 Frequency response curves when the segment number is fixed and the total length is changed

和 12mm 时,  $z$  方向电场强度频率响应的峰值分别为 63.5dBV/m, 63.8dBV/m, 62.9dBV/m 和 62.1dBV/m, 峰值处的频率值分别为 2.27GHz, 2.63GHz, 3.27GHz 和 5.24GHz, 此时, 3dB 频率响应带宽分别为 2.68GHz, 2.87GHz, 3.45GHz 和 5.91GHz。可以看出, 在电极的分段数恒定时, 随着电极总长度的缩短, 电极上的电场强度频率响应的峰值变化不大, 峰值处的频率则逐渐升高, 频率响应带宽也是逐渐加宽的。但是, 当电极总长度较大时, 光波导中 Pockels 效应的作用区域更大, 因而, 此时平行于  $z$  方向的待测电场在  $y$  方向上的电场长度积较大。由此可知, 在分段数一定的情况下, 减小电极总长度将有利于频率响应带宽的增加, 但同时会导致电场长度积的减小, 从而使得调制效率降低, 并降低了电场传感器的灵敏度。因此, 在设计分段电极结构的总长度时, 需要从频率响应带宽和灵敏度两方面来进行综合考虑。

图 5 描述了当分段电极的总长度  $L = 42$ mm、分段数  $N$  取不同值时, 电场的频率响应曲线。当  $N$  分别为 10, 15, 20 和 30 时,  $z$  方向电场频率响应的峰值分别为 63.5dBV/m, 66.7dBV/m, 69.1 dBV/m 和 71.9dBV/m, 峰值处的频率值分别为 2.27GHz, 2.21GHz, 2.23GHz 和 2.32GHz, 而 3dB 频率响应带宽分别为

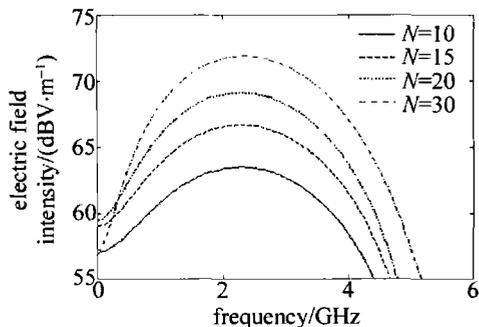


Fig. 5 Frequency response curves when the total length is fixed and the segment number is changed

2.68GHz, 2.61GHz, 2.52GHz 和 2.51GHz。可见,在电极总长度一定、分段数增加时,电场强度频率响应的峰值逐渐增大,峰值处的频率变化不明显,频响带宽则略有减小。但分段数较大时, $z$  方向的电场值较大,这将有利于提高灵敏度和增加调制效率。因而从理论上来说,分段数越多,器件的性能会越好。但是考虑到实际制造工艺的因素,分段数越多越容易造成分段电极间的电极粘连,这样反而会使得该电场传感器的传感性能大大降低。所以,设计时需要结合制造工艺的实际情况,选取合适的分段数。

#### 4 实验结果及分析

按照图2中设计的电极结构,作者实际制作了一个集成光波导分段电极电场传感器。首先,在尺寸为 $60\text{mm} \times 6\text{mm} \times 0.5\text{mm}$ 的 $x$ 切 $y$ 传 $\text{LiNbO}_3$ 晶体基片上制作出M-Z光波导干涉仪,其波导宽度为 $7\mu\text{m}$ ,波导间距为 $20\mu\text{m}$ ;然后在波导上制作出分段电极,其总长度为 $42\text{mm}$ ,共分为10段。

在GTEM cell中,对制作的电场传感器的频率响应特性进行了测试,实验装置如图6所示。测试时将

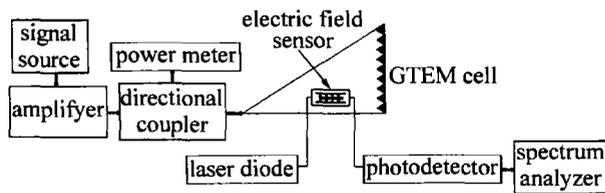


Fig. 6 Measuring system for GTEM cell

输入电场的强度恒定在 $20\text{V/m}$ ,极化方向与光波导的 $y$ 方向平行,传播方向垂直于M-Z调制器平面,记录当信号源发射不同频率的电磁波时,频谱分析仪中的信号电平信息,结果如图7所示。实验中测得的光波导

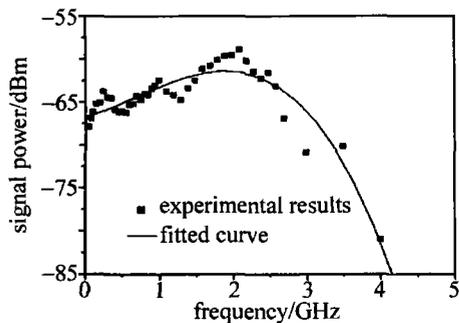


Fig. 7 Measured results of the fabricated device

分段电极电场传感器频率响应的峰值在 $2.1\text{GHz}$ 附近, $3\text{dB}$ 带宽约为 $2.18\text{GHz}$ 。实验中测得的结果与前面数值仿真得到的结果的趋势大致相符,曲线的形状也基本相同,但仍有一定的偏差,并且实验值也存在轻微的上下波动,这主要是因为GTEM cell内的电场分

布并非绝对均匀,实际制作的器件参量存在一定的误差,另外环境噪声对测量值也会有干扰。

#### 5 结论

作者使用FDTD方法对集成光波导电场传感器分段电极的频率响应特性进行了分析。结果表明,在电极的分段数一定时,减小电极总长度会使得频率响应带宽增加;在电极总长度一定时,分段数的变化对频率响应带宽的影响不大。这说明,较短的电极对高频电磁场的响应更好,因而中心频率移向高频,带宽也相应增大。根据电极频率响应的特性,综合考虑器件的电场长度积和制造工艺中的实际情况就能对电极尺寸进行合理的设计,从而得到满足具体应用需求的器件。实际制作器件的测试结果与仿真结果大致相符,说明通过数值仿真来设计电场传感器的分段电极结构对器件的制作具有指导意义。

#### 参考文献

- [1] TAJIMA K, KOBAYASHI R, KUWABARA N, *et al.* Development of optical isotropic e-field sensor operating more than  $10\text{GHz}$  using Mach-Zehnder interferometers [J]. *IEICE Transactions on Electronics*, 2002, E85-C(4): 961-968.
- [2] SAMSON S, LI W H, TAVLYKAEV R, *et al.* Electro-optic measurements using a Mach-Zehnder interferometer with domain reversals [J]. *Proceedings of SPIE*, 1996, 2749: 186-194.
- [3] SUN B, CHEN F Sh, YANG Y J. Integrated optical electric field sensor with telescopic dipole [J]. *Chinese Physics Letters*, 2008, 6(5): 350-352.
- [4] SUN B, CHEN F Sh. Analysis on bias point of integrated optical E-field sensors [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2009, 30(5): 672-675 (in Chinese).
- [5] YEE K Sh. Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1966, 14(3): 302-307.
- [6] WANG C Q, ZHU X L. *FDTD method in electromagnetic field calculation* [M]. Beijing: Peking University Press, 1994: 22-23 (in Chinese).
- [7] FUSCO M. FDTD algorithm in curvilinear coordinates [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1990, 38(1): 76-89.
- [8] TAFLOVE A, HAGNESS S C. *Computational electrodynamics: the finite difference time domain method* [M]. Norwood, USA: Artech House, 2000: 141.
- [9] GE D B, YAN Y B. *FDTD method for electromagnetic wave* [M]. Xi'an: Xidian University Press, 2005: 117-148 (in Chinese).
- [10] GAO B Q. *FDTD method* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1995: 22-29 (in Chinese).
- [11] SKINNER N G. *FDTD studies of frequency selective surfaces* [R]. Dallas, USA: University of Texas at Dallas, 2006: 40-42.
- [12] GE D B, SHI S Y, ZHU Z W. A new FDTD scheme for introducing incident fields [J]. *Journal of Microwaves*, 1995, 11(3): 187-190 (in Chinese).