

电光传感测量电场的建模与仿真

由于光纤以及晶体光学制备技术的成熟,电光传感器测量电场成为主要方法。基于Mach-Zehnder电光传感器的工作原理,为了对Mach-Zehnder电光传感器进行优化设计,在有限元仿真软件中进行了建模仿真,确定了光传输功率损耗最小的波导弯曲半径为2.5 mm,3dB定向耦合器的长度为380 μm,最后在信号臂上加一个电场,得出了在测量范围内所加电场与输出功率呈线性关系,说明该传感器可以较准确地测量电场。

石云飞¹ 刘 华² 刘 君¹/1.华北电力大学电气与电子工程学院 2.黑龙江省电力有限公司计量中心



石云飞/硕士研究生

关键词/Keywords

电场测量 ·
马赫-曾德尔 ·
电光传感器 ·
有限元仿真 ·

0 引言

电场是描述电磁场最基本的物理量,因而电场测量在许多领域有着广泛的应用与意义,特别是在电力系统中,准确测得电气设备周围的电场对电力系统的安全与稳定运行有着非常重要的意义。此外,在电磁兼容的研究中,电场测量可以检测电子、电气设备的电磁辐射与干扰。随着特高压电网的发展,电磁技术在带给人们无限便利的同时,也将人们带进了一个电磁辐射的环境中,越来越多的人开始意识到辐射的危害,电场的测量对预防电磁辐射也有着重要的意义。

随着集成光学的快速发展,基于Pockels效应的光学电场传感器测量系统具有尺寸小、准确度高、灵敏度好、动态范围大、响应速度快和高带宽等诸多优点^[1],克服了传统有源线圈探头体积庞大、容易漂移以及受电磁干扰大等缺点。其中比较成熟的就是Mach-Zehnder

电光传感器,这种电场测量方法不仅具有光学电场测量系统的高准确度、高灵敏度等优点,还可以测出空间电场的大小和方向,从而可以判断电场辐射源的位置,广泛地应用在隔离开关、水雷引信和辐射监测等众多领域。为此,本文详细介绍了电场对晶体折射率改变的表达式以及Mach-Zehnder电光传感器的工作原理,并在有限元仿真软件中进行了验证,结果与理论能够很好地吻合。

1 铌酸锂线性电光效应

折射率椭球是表示晶体折射率(对某个特定的频率)在晶体空间各个方向上全部取值分布的几何图形。铌酸锂晶体具有旋转对称性,折射率椭球方程的表达式为

$$\frac{x^2}{n_o^2} + \frac{y^2}{n_o^2} + \frac{z^2}{n_e^2} = 1 \quad (1)$$

式中, n_o 、 n_e 分别为单轴晶的寻常光和非常光的主折射率。

当所加电场方向平行于光轴时,即 $E_1 = E_2 = 0$,由于线性电光效应,查阅文献[2]可得铌酸锂晶体的电光张量与折射率改变关系如式(2)所示。其中, E 为外加电场; γ_{ij} 为线性电光张量各分量。

$$\begin{pmatrix} \Delta\left(\frac{1}{n^2}\right)_1 \\ \Delta\left(\frac{1}{n^2}\right)_2 \\ \Delta\left(\frac{1}{n^2}\right)_3 \\ \Delta\left(\frac{1}{n^2}\right)_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & -\gamma_{22} & \gamma_{13} \\ 0 & \gamma_{22} & \gamma_{13} \\ 0 & 0 & \gamma_{33} \\ 0 & \gamma_{51} & 0 \\ \gamma_{51} & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ E_3 \end{pmatrix} \quad (2)$$

国家自然科学基金项目《获取光学电流互感器关键时变参数的复合反馈传感技术研究》(51277066)。

$$\begin{pmatrix} \Delta\left(\frac{1}{n^2}\right)_5 \\ \Delta\left(\frac{1}{n^2}\right)_6 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} -\gamma_{22} & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

由此可得新的折射率椭球方程为

$$\left(\frac{1}{n_o^2} + \gamma_{13}E_3\right)x_1^2 + \left(\frac{1}{n_o^2} + \gamma_{13}E_3\right)x_2^2 + \left(\frac{1}{n_e^2} + \gamma_{33}E_3\right)x_3^2 = 1 \quad (3)$$

式(3)没有交叉项,可见在铌酸锂晶体的z方向加电场后,其三个主轴没有旋转,而且这三个主折射率虽有变化,但它仍然保持为一个光轴沿 x_3 轴方向的单轴晶体。下面用微分法求出折射率变化量

$$\Delta\left(\frac{1}{n_o^2}\right) = \gamma_{13}E_3 \quad \Delta\left(\frac{1}{n_e^2}\right) = \gamma_{33}E_3 \quad (4)$$

由于 γ_{13} 、 γ_{33} 数值很小,可利用微分关系

$$\begin{aligned} d\left(\frac{1}{n_o^2}\right) &= -2\frac{1}{n_o^3}dn_o = \gamma_{13}E_3 \\ d\left(\frac{1}{n_e^2}\right) &= -2\frac{1}{n_e^3}dn_e = \gamma_{33}E_3 \end{aligned} \quad (5)$$

故可得

$$\begin{aligned} \Delta n_o &= -(1/2)n_o^3\gamma_{13}E_3 \\ \Delta n_e &= -(1/2)n_e^3\gamma_{33}E_3 \end{aligned} \quad (6)$$

可见折射率的变化与所加电场呈线性关系。由于铌酸锂晶体介电张量中 γ_{33} 数值最大,为了获得最大的折射率改变,一般选取z切方向。

2 Mach-Zehnder电光调制器工作原理

Mach-Zehnder电光调制器工作原理如图1所示,激光通过一个3 dB耦合器被分成功率相等的两束光,分别在信号臂和参考臂传播。当信号臂无外加作用力时,两条分支光波导中传输的光存在固定的相位差 φ_0 ;当有外界作用力作用在信号臂上时,此外界作用力即为所测电场,由于Pockels效应会使信号臂中光的折射率发生改变,从而导致其传输相位延迟 φ 。

因两条光路中传播的光再次合成时会发生干扰,通过测量输出光的光功率即可感知到外界电场的变化,经计算证实静态工作点附近输出功率与所测电场呈线性关系^[3],只要测出光功率就可得

到外加电场,据此可详细设计出电场传感器。

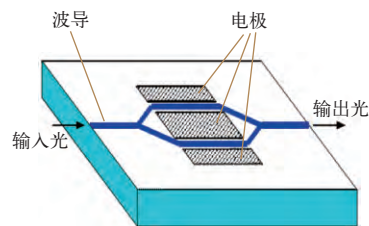


图1 Mach-Zehnder电光调制器工作原理

3 Mach-Zehnder电光调制器建模与仿真

3.1 模型定义

电磁波光束包络接口制定假设电场被定义为一个缓慢变化的包络函数乘积和一个快速变化的相位函数,即

$$E = E_1 \exp(-jkr)$$

式中, E_1 为包络函数; k 为波矢量; r 为位置。 k 根据问题适当设定,包络函数 E_1 将有一个长度尺度比波长大得多的空间变化发生。对于该模型,好的假设就是利用波矢 β 近似直域。然而,在波导弯曲的波矢可以写为

$$\beta_2 = \beta(\cos \alpha x + \sin \alpha y) \quad (7)$$

式中, $\beta = k_0 n_{\text{eff}}$ 为这个模型的传播常数, k_0 为真空波数, n_{eff} 为波导模的有效折射率; α 为 x 轴的夹角; x 和 y 分别为在 x 和 y 方向上的单位矢量。

波矢的区别是

$$\beta_2 - \beta = \beta[(\cos \alpha - 1)x + \sin \alpha y] \quad (8)$$

正是波矢差值确定了包络线的相位变化场。因此,必须确保网格能够解决相位变化,如

$$(\beta_2 - \beta)\Delta r \leq 2\pi / N \quad (9)$$

式中, N 为一个适当大的数,可取6。

从上面的关系可以得到该最大网格单元尺寸在 x -和 y -方向应是

$$h_{x,\max} = \frac{\lambda}{N n_{\text{eff}} (1 - \cos \alpha)} \quad (10)$$

$$h_{y,\max} = \frac{\lambda}{N n_{\text{eff}} \sin \alpha} \quad (11)$$

3.2 建模与分析

打开COMSOL软件,按照模型向导依次选择

二维几何模型，电磁波（光束包络）物理场求解类型为瞬态。

(1) 绘制几何模型

Mach-Zehnder的几何结构模型如图2所示。

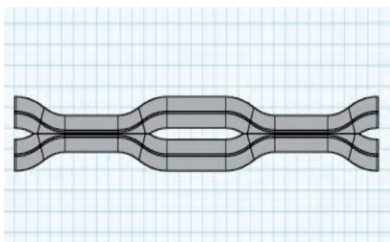


图2 Mach-Zehnder的几何结构模型

(2) 添加材料

将电光传感器传输波导设定为铌酸锂晶体，折射率为2.22，外部覆盖层的折射率设定为2.2。

(3) 设定初始值和边界条件

将外部边界全部设定为散射边界条件，散射边界允许波从任何方向入射，但是只吸收传输方向接近法线方向的光，对于其他方向的光则透明。这样设定在计算波损耗时误差很小。设定四个端口分别为端口边界条件，用来求解传输损耗以及光功率。

(4) 构建网格

根据式(10)和式(11)设定最大网格单元尺寸在x和y方向分别为 $h_{x,max}$ 、 $h_{y,max}$ 。划分网格结果如图3所示。



图3 网格划分

(5) 求解

采用边界模式分析进行求解，设置的参数如图4所示。

然后单击计算进行计算，电场强度分布结果如图5所示。从图5中可以看出所设置的波导弯曲半径不合适，导致光无法沿波导进行传输，所以必须增加波导弯曲半径，为了找到最适合的弯曲半径，采用参数化扫描来分析。

设置波导弯曲半径在扫描范围100~1 000 μm



图4 边界模式分析参数设置

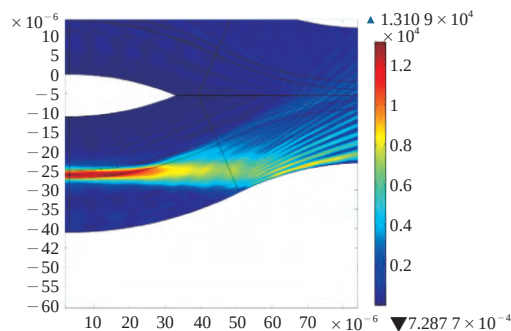


图5 波导传输电场强度分布

之间进行扫描，步长为400 μm 。计算完毕后在结果分析中用一维绘图组画出S形弯曲波导传输率随曲率半径的变化图，如图6所示。图中显示了S形弯曲的能量传输，弯曲半径为2.5 mm，功率透射率约为98%，只有2%的损耗，因此可以确定弯曲半径为2.5 mm。

(6) 3 dB耦合器的设计

定向耦合器的结构设计为3 dB耦合器，即从两个输出臂输出的功率为输入的一半。为了找到满足这一条件的耦合器长度，通过扫描定向耦合器的长度来监测Mach-Zehnder干涉仪两个臂的功率差。先将S形弯曲半径设置为2.5 mm，同样采用参数化扫描方法对定向耦合器进行扫描，然后作出两个波导臂之间功率差的绝对值随定向耦合器长度的变化图，如图7所示。当耦合器长度为380 μm 时，两臂之间功率差为0，即两个输出臂输出的功率相等。

干涉仪两个波导臂中的场强如图8所示。由图

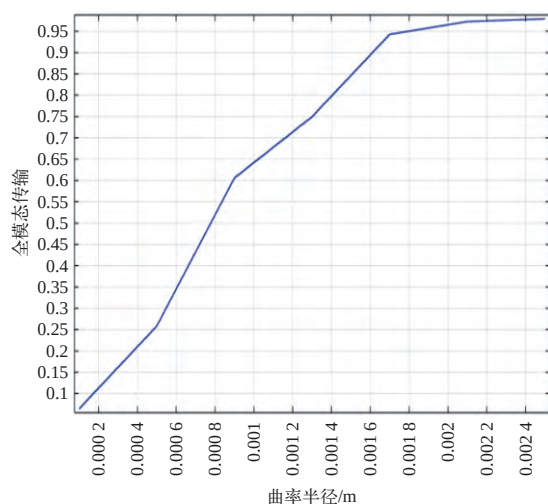


图6 弯曲波导传输率随曲率半径的变化

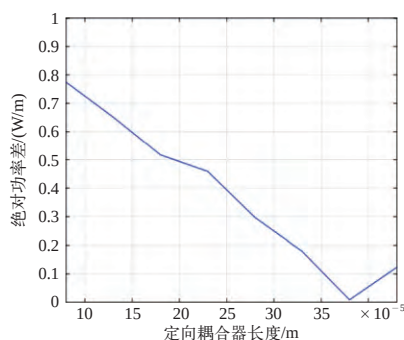


图7 Mach-Zehnder干涉仪两个波导臂之间功率差的绝对值随定向耦合器长度的变化

8可知,当定向耦合器的长度为380 μm 时,两个输出臂电场强度相同。

(7) 输出功率与所加电压的关系

将电压加在该波导中的一个臂上。施加的电压改变了该臂的折射率,因此通过Mach-Zehnder干涉仪臂的两束波之间会产生一个相位差,由前述原理可知输出功率与所加电压呈线性关系,所以只要测出功率值即可知道所加电压值,电压除以波导宽度即为电场。图9为电压与输出功率的关系曲线,正如预期的那样,两者呈线性关系。

4 结束语

详细介绍了Mach-Zehnder电光调制器的工作原理,为了准确测量电场,需要对其结构进行优化设计。用有限元仿真软件对其波导弯曲半径以

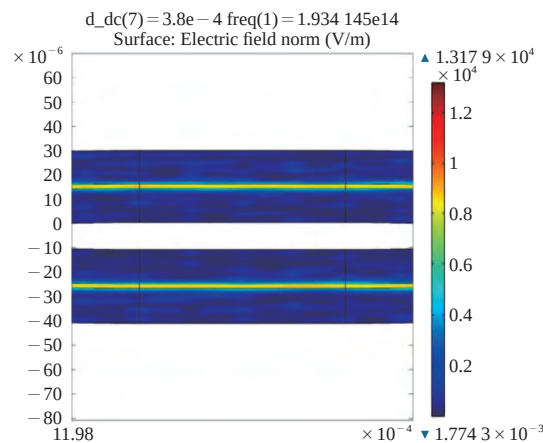


图8 干涉仪的两个波导臂中的场强

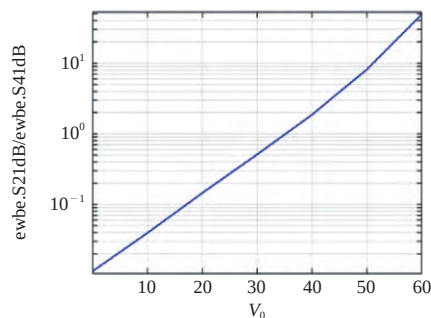


图9 输出功率与所施加的电压 V_0 的关系

及传感臂长度进行了优化设计,得出了波导弯曲半径为2.5 mm时,光传输功率损耗最小;定向耦合器的长度为380 μm 时,定向耦合器效率最高。最后通过所加电压与输出功率的关系图,可以看出两者线性关系拟合性较好,说明优化后的电光调制器可以准确地测量电场。这一研究结果对于电力系统中测量电场的研究具有指导意义。

参考文献

- [1] 李长盛,崔翔. 光学电场传感器研究综述 [J]. 电气应用, 2008, 27 (16): 28-45.
- [2] Alferness R C. Waveguide electropit modulators [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1982, 30 (8): 1121-1137.
- [3] 曾蝶,陈未远,何金良. 电光集成强电场测量系统及其应用研究 [J]. 高电压技术, 2006, 32 (7): 1-5, 32.

(收稿日期: 2015-02-06) EA