



·效应、试验与评估·

基于集成光学的兆伏每米强脉冲电场传感器研制

石跃武, 陈伟, 聂鑫, 王伟, 苗建国, 吴伟,
陈志强, 谢霖燊, 吴刚, 贾伟

(西北核技术研究所 强脉冲辐射环境模拟与效应全国重点实验室, 西安 710024)

摘 要: 针对兆伏每米 (MV/m) 强脉冲电场的测量需求, 设计并研制了基于集成光学的共路干涉仪 (CPI) 小体积宽带脉冲电场传感器。基于电光效应及电光调制原理, 建立了传感器的幅度和频率响应传递函数, 分析了集成光学探头的接收特性, 并推导了探头灵敏度和带宽随波导长度的关系。设计了适用于 MV/m 量级脉冲电场测量的纯光学非金属 CPI 传感器, 提出了利用晶体宽度对测量灵敏度调控的方法, 使得设计的半波电场提高了 2 倍以上。研制的无源探头体积小于 20 mm×10 mm×5 mm、理论带宽大于 4 GHz、最大测量幅度大于 1.2 MV/m。研制的传感器在高空电磁脉冲 (HEMP)、雷电电磁脉冲 (LEMP) 及脉冲功率等领域具有应用前景。

关键词: 共路干涉仪; 脉冲电场; 集成光学; 传感器; 电光效应

中图分类号: O441.5

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202436.230249

Development of the integrated-optics-based sensor for MV/m intense pulse electric field

Shi Yuewu, Chen Wei, Nie Xin, Wang Wei, Miao Jianguo, Wu wei,
Chen Zhiqiang, Xie Linshen, Wu Gang, Jia Wei

(National Key Laboratory of Intense Pulsed Radiation Simulation and Effect, Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China)

Abstract: To meet the requirements of MV/m intensity pulse electric field measurement, a single optical path type small volume broadband pulse electric field measurement system based on integrated optics is designed and developed. Based on electro-optical effect and electro-optic modulation principle, the amplitude and frequency response transfer function of the measuring system is established, the reception characteristics of the integrated optical probe are analyzed, the relationship between its sensitivity and bandwidth with the length of the waveguide is derived. The pure optical non-metallic single-optical waveguide structure is designed, and a method of adjusting the measurement sensitivity using crystal width is proposed, which raised the designed half-wave electric field more than 3 times. The passive probe size is less than 20 mm×10 mm×5 mm, the theoretical bandwidth is more than 4 GHz, and the maximum measurement range is more than 1.2 MV/m. The developed measurement system has applications in the fields of high-altitude electromagnetic pulse (HEMP), lightning (LEMP) and pulsed power technology.

Key words: common path interferometer, pulsed electric field, integrated optics, sensor, electro-optical effect

在强电磁脉冲效应研究中, 通常存在强电磁脉冲的测量需求。高性能的传感器特别是兆伏每米量级小体积强场传感器在电磁脉冲领域需求迫切, 脉冲瞬态电场传感技术研究已持续多年, 但相关技术一直是研究热点和难点。目前主流的电场传感器可归结为三类: 基于微分测量的 D-dot 传感器、基于光纤传输的电学传感器和基于光纤传输的集成光学传感器。目前, 国内外相关领域已开展大量相关研究。D-dot 传感器^[1]最早由美国 EG&G 公司研制, 同时研制和销售此类传感器的还有美国的 Prodyn 公司和瑞士的 Montena 公司等, 国内西北核技术研究所、西安交通大学等机构均开展相关研究工作^[2-5]。经过优化设计, 此类传感器测试频率可达 10 GHz。其虽为无源结构, 但基于电缆传输, 存在尺寸较大、金属成分多等问题, 在使用时存在许多限制。通过配备光纤传输系统, 可解决电缆传输问题, 但由于传输系统限制, 会限制测量系统带宽性能, 同时依旧存在尺寸较大的问题。基于电光集成

* 收稿日期: 2023-08-01; 修订日期: 2023-12-18
联系方式: 石跃武, shiyuewu@nint.ac.cn.

的有源积分式电场传感器^[6]通过将 D-dot 传感器、有源积分模块和电光转换模块进行整合设计形成,其一般是通过电小天线实现信号接收,后经有源集成运放电路完成阻抗变换,信号通过半导体激光器实现电光转换,最终以光信号形式输出,此类传感器的待测信号与输出信号具有线性关系,可以通过光纤进行传输,具有集成度高、体积小、原理简单、性价比高等优点,目前已有针对此类传感器的大量研究成果^[7-12],并广泛应用于强电磁脉冲的测量中。另外,基于电光效应的集成光学电场传感器具有带宽宽、无源、体积小、抗扰动能力强等优点,在电磁脉冲测量领域具有相当大的优势,但由于传感器探头芯片饱和,针对更强幅度的电磁脉冲测量则存在瓶颈,其测量上限通常在 100 kV/m 量级,为此,国内外针对性地开展了许多研究^[13-20],特别是近年来国内西北核技术研究所、中国工程物理研究院、清华大学等单位针对电力系统、雷电、高空电磁脉冲等领域的研究需要,采用不同技术手段研制出一系列的集成光学电磁脉冲测量系统。但从公开报道来看,目前对于强脉冲电场测量,重点针对的场强幅度范围主要在 kV/m 至百 kV/m 量级。由于传感器灵敏度调控的困难,鲜有针对测量上限超过 MV/m 的电磁脉冲测量技术研究。

本文针对 MV/m 的强脉冲电场测量需求,开展了基于集成光学的强脉冲电场测量技术研究,设计并研制了小体积、高带宽、高测量上限的共路干涉仪(CPI)型脉冲电场探头,形成了 MV/m 脉冲强电场测量能力。

1 集成光学电场传感器结构

本文基于 CPI 型传感器模型进行设计,传感器结构如图 1 所示。传感器为纯光学无天线无电极结构,晶体上制作光波导用于光信号传播,外电场直接作用于光波导。波导设计为 x 切 y 传结构,不同于通常的 x 切 z 传结构,此种结构下可利用 2 个偏振方向光的折射率微小差异,实现自然偏置点的设置与调控。激光通过保偏光纤经 45°起偏器后在波导中沿 x 和 z 方向偏振,两个方向光幅度相等经波导后在输出端由 -45°检偏器进行耦合。考虑体积、带宽、灵敏度等因素,光波长设计为 1550 nm、晶体长度 14 mm、宽度 4 mm、厚度 1 mm。

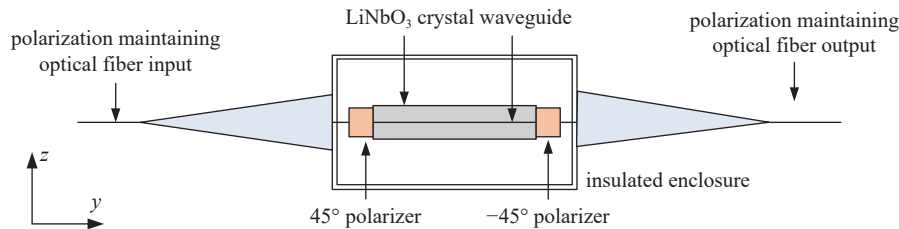


Fig. 1 Structure of optical electric field sensor

图 1 光学电场传感器结构

2 集成光学传感器原理及参数设计

2.1 电光调制

集成光学耦合结构的电场探头传输函数的基本模型可归纳为^[13-20]

$$I_{\text{out}} = \frac{1}{2} I_{\text{in}} g [1 + \cos(\Delta\varphi + \Delta\psi)] \quad (1)$$

式中: I_{in} 和 I_{out} 分别为输入输出光功率; g 为传输光损耗; $\Delta\varphi$ 为传感器在电场作用下的相位变化,近似与外加电场呈正比,此项与传感器灵敏度相关; $\Delta\psi$ 为不加电场时,不同光分量之间受其余自然因素影响下的自然相位差,称作自然偏置点。

当传感器自然偏置点为 $\pi/2$ 、且输入电场较小时的输出光功率为

$$I_{\text{out}} = \frac{1}{2} I_{\text{in}} g [1 - \sin(\Delta\varphi)] \approx \frac{1}{2} I_{\text{in}} g (1 - \Delta\varphi) \quad (2)$$

将输出信号滤除直流后,输出信号与输入电场近似呈正比关系。通过监测输出光功率即可实现脉冲电场测量。下面分别分析其接收特性、偏置点及频率响应。

2.2 接收特性

晶体受外加电场作用时,其折射率会随之产生变化,此现象被称为 Pockels 效应。对于铌酸锂晶体,其外加电场与折射率的变化关系为^[21]

$$(\Delta n)_i = -\frac{n_i^3}{2} \begin{bmatrix} -r_{22}E_2 + \gamma_{13}E_3 \\ r_{22}E_2 + \gamma_{13}E_3 \\ r_{33}E_3 \\ \gamma_{51}E_2 \\ \gamma_{51}E_1 \\ -\gamma_{51}E_1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: γ_{22} 、 γ_{13} 、 γ_{33} 、 γ_{51} 为晶体电光常数; E_1 、 E_2 和 E_3 分别为 x 、 y 和 z 方向的电场分量。

本文中波导的输入光沿 x 和 z 方向偏振, 传播方向为 y 方向。在 x 和 z 方向上折射率分别为寻常光折射率 n_o 和非寻常光折射率 n_e , x 和 z 方向折射率变化量为

$$(\Delta n)_x = -\frac{n_o^3}{2} (-r_{22}E_2 + \gamma_{13}E_3) \quad (4)$$

$$(\Delta n)_z = -\frac{n_e^3}{2} \gamma_{33}E_3 \quad (5)$$

当电场 E 施加至传感器且电场方向仅为 z 方向时, 两个方向光的相位差为

$$\Delta\varphi = \Delta\varphi_x - \Delta\varphi_z = \frac{2\pi L\Gamma}{\lambda} (\Delta n_x - \Delta n_z) = \frac{\pi L\Gamma E}{\lambda} (n_e^3 \gamma_{33} - n_o^3 \gamma_{13}) = \frac{\pi E}{E_\pi} \quad (6)$$

式中: λ 为输入光波长; L 为电光作用长度, 由于本文设计的传感器为纯光学无天线、无电极结构, 电场直接作用于晶体上的波导, 电光作用长度与晶体长度和波导长度等长; Γ 为积分重叠因子; E_π 为调制光路的半波电场, 代表相位差改变 1 个 π 所需施加于波导的被测电场, E_π 可描述为

$$E_\pi = \frac{\lambda}{L\Gamma(n_e^3 \gamma_{33} - n_o^3 \gamma_{13})} \quad (7)$$

上面的推导中, E 为直接作用于波导的电场。考虑到管壳封装等因素, 被测电场会受管壳及晶体本身的影响导致实际作用于波导的电场与被测电场值存在较大差异。波导上电场 E 与被测电场 E_m 的比值用参数 η 来表示, 即

$$\eta = \frac{E}{E_m} \quad (8)$$

显然, 传感器的半波电场 $E_{m\pi}$ 与晶体的半波电场关系为

$$E_{m\pi} = \frac{1}{\eta} E_\pi = \frac{\lambda}{\eta L\Gamma(n_e^3 \gamma_{33} - n_o^3 \gamma_{13})} \quad (9)$$

根据式(9)可知, 半波电场与晶体长度呈反比关系, 为获取较大的半波电场, 传感器的晶体长度需要尽可能的短, 这一方面出于强场探测的需要, 另一方面也可尽量减小传感器的体积。利用式(9)估算, 要实现 4 MV/m 以上的半波电场, 晶体长度应小于 3 mm。但考虑到工程可操作性, 太短的晶体长度会导致封装困难, 通常商用调制器件的晶体长度在 25 mm 以上, 综合考虑, 晶体长度设计为 14 mm。

铌酸锂晶体折射率与波长的关系按式(10)和式(11)进行计算^[19]

$$n_o^2 = 4.9048 + \frac{0.11768}{\lambda^2 - 0.04750} - 0.027169\lambda^2 \quad (10)$$

$$n_e^2 = 4.58200 + \frac{0.099169}{\lambda^2 - 0.044443} - 0.02195\lambda^2 \quad (11)$$

计算得到 1550 nm 下晶体寻常光折射率为 2.21, 非寻常光折射率为 2.14。晶体电光常数 γ_{13} 和 γ_{33} 分别为 8.6×10^{-12} m/V 和 30.8×10^{-12} m/V。若积分重叠因子取 0.6^[21], 计算得到调制光路的半波电场为 0.88 MV/m。通常我们认为, 对于纯光学的无电极结构传感器, 被测电场与作用于晶体表面调制光路的电场相等。然而对于一些特殊情形, 调制光路的半波电场并不能完全等同于传感器的半波电场。由于铌酸锂有很高的介电常数, 当外加电场作用于晶体时, 其晶体表面会产生束缚电荷, 导致被测场与波导处电场产生差异。对于本文的无电极情形, 当晶体足够宽时, 波导距离表面束缚电荷较远, 波导表面 z 方向电场幅度接近于被测电场。随着晶体宽度的减小, 束缚电荷距离波导越近, 在波导位置形成的电场越小。

基于上述原理, 本文通过调整晶体宽度, 改变晶体两侧受外电场作用时的束缚电荷及其在波导位置形成的电

场强度,以调控光波导位置的电场削弱程度,实现了传感器的灵敏度调控,并基于 CST 仿真研究了不同波导宽度对灵敏度调控程度的影响。基于研究结果完成了晶体宽度设计,提高了传感器的幅度测量上限。

由于矩形介质在外电场中的解析求解较为复杂,文中在 CST microwave studio 中建立仿真模型,研究了与灵敏度相关的参数 η 与波导宽度的关系。建立的仿真模型如图 2 所示,建立的传感器模型由塑料外壳和晶体部分构成。塑料外壳模型尺寸 20 mm×10 mm×6 mm,厚度为 1 mm。晶体长度 14 mm、厚度 1 mm、宽度为 1~6 mm。仿真时采用双指数脉冲作为输入信号,脉冲电场波形前沿 2.5 ns、半宽 23 ns、幅度 1 V/m。仿真中监测晶体 yz 表面中心位置处的电场以反映波导电场。

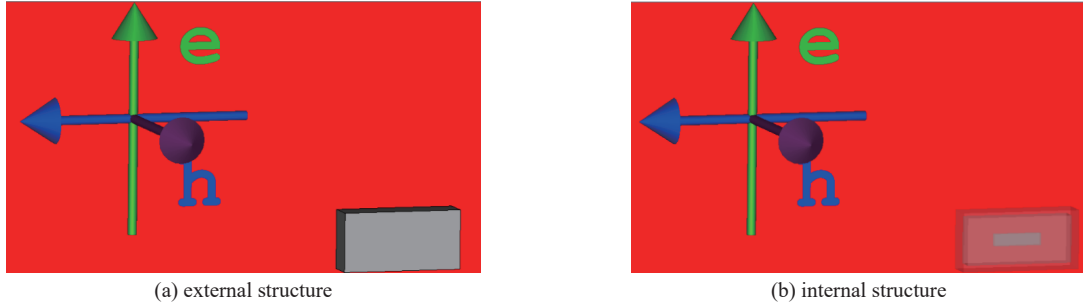


Fig. 2 Simulation model in CST microwave studio

图 2 CST microwave studio 中建立的传感器仿真模型

图 3 为晶体宽度为 1~6 mm 时输入波形及监测点波形,可以看出,晶体 yz 表面中心电场随着晶体宽度增加而逐步减小。按传感器半波电场的四分之一估算线性测量区间^[23],若设计最大测量电场为 1 MV/m,需要传感器的半波电场大于 4 MV/m,依据式(9)可估算得出 η 取值应不大于 0.2。由于输入电场幅度为 1,仿真得到的晶体表面电场幅度即为 η ,根据仿真结果,晶体宽度取 4 mm 时对应的 η 约 0.19,对应传感器半波电场约 4.6 MV/m,线性测量范围约 1.2 MV/m,满足设计要求。相比于传统的 10 mm 以上晶体宽度(η 值大于 0.4),文中设计的半波电场可提高一倍以上,大幅度提高了测量上限。

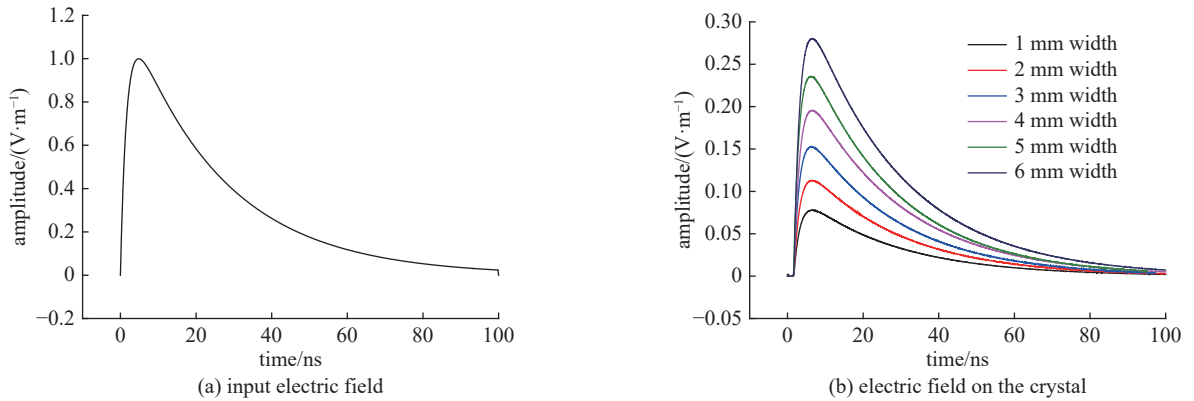


Fig. 3 Input pulse electric field and simulation results of the electric field on crystal surface

图 3 输入脉冲电场及晶体表面中心电场仿真结果

由于重叠积分因子 Γ 和衰减参数 η 均无法准确估计,上述计算值仅作设计参考,实际半波电场应以标定结果为准。

2.3 偏置点

集成光学电场传感器在设计使用时存在严重的参数漂移现象,传感器插入损耗和半波电压的漂移可以通过标定进行补偿,工作点的漂移则会严重影响传感器的性能。目前采用的工作点设置办法有外加直流偏置、设置自然偏置点以及应力控制等。对传感器直接外加直流偏置会造成与被测电场的互相干扰、影响测量结果、降低传感器工作性能。设置自然偏置点和应力控制等方法则无法控制温度漂移带来的影响。

式(1)中偏置点可进一步分解为两个部分,即

$$\Delta\psi = \Delta\psi_1 + \Delta\psi_2 \quad (12)$$

式中: $\Delta\psi_1$ 为无外加电场作用时由 2 个偏振方向的光路非对称引入的相位差; $\Delta\psi_2$ 为由温度等环境因素引入的附

加相位变化。

对于设计的 x 切 y 传的 CPI 型传感器, x 和 z 方向偏振的寻常光和非寻常光折射率存在微小差异, 无电场作用时, 两个偏振方向的光在波导中因存在相位差而形成自然偏置点。 $\Delta\psi_1$ 可表示为

$$\Delta\psi_1 = \frac{2\pi L}{\lambda} (n_o - n_e) \quad (13)$$

可以看出, 传感器的偏置是与波长相关的函数。利用传感器的自然偏置点与波长相关的特点, 结合光波长微调, 可实现偏置设置和控制。目前已针对偏置控制开展研究工作, 并在 10 kV/m 量级脉冲电场探头的使用中得以应用, 取得了很好的效果^[19], 相关方法可直接应用于文中设计的传感器。

2.4 频率响应

由于产生幅度标准的频域场环境较为困难, 针对强场测量传感器, 一般难以给出带宽标定结果, 针对无源脉冲传感器, 本文通过理论分析, 推导了其理论带宽与波导长度的关系。

传感器的带宽主要受天线和电光速度失配的影响。波导长度决定光波和电场的作用时间, 由于电场和光场的速度失配, 对传感器的带宽会产生影响。不同于商用的电光调制器设计的行波电极, 在电磁脉冲测量中, 一般传感器正对电磁波波矢方向, 电磁波同时到达波导各处, 对其带宽分析时, 不需要考虑电场的传播速度。此时在电场传感器中速度失配达到最大, 对带宽有明显的限制。

式(6)适用于低频信号情形, 此时传感器的相位变化正比于波导长度 L 。考虑电场的频域形式, 即

$$E = E_0 e^{j\omega t} \quad (14)$$

将式(6)改为积分形式, 且考虑寻常光和非寻常光折射率较为接近, 即

$$\begin{aligned} \Delta\varphi &= \frac{\pi L \Gamma E_0}{\lambda} (n_e^3 \gamma_{33} - n_o^3 \gamma_{13}) \sum_L \Delta L e^{j\omega t} \approx \frac{\pi L \Gamma c E_0}{\lambda} (n_e^3 \gamma_{33} - n_o^3 \gamma_{13}) \int_{t_0}^{t_0 + \frac{n_o L}{c}} e^{j\omega t} dt \\ &= \frac{\pi L \Gamma c E_0}{\lambda} (n_e^3 \gamma_{33} - n_o^3 \gamma_{13}) \frac{e^{j\omega t_0}}{j\omega} (e^{j\omega \frac{n_o L}{c}} - 1) \end{aligned} \quad (15)$$

式中: c 为光速。

频域传输函数为

$$S(\omega) = \frac{\max[\operatorname{Re}(\Delta\varphi)]}{\max[\operatorname{Re}(E)]} = A \cdot \max_{t_0} \left| \sin\left(\omega t_0 + \frac{n_o L \omega}{c}\right) - \sin\omega t_0 \right| = A \cdot \max_{t_0} \left| \cos\left(\omega t_0 + \frac{n_o L \omega}{2c}\right) \sin \frac{n_o L \omega}{2c} \right| = A \left| \sin \frac{n_o L \omega}{2c} \right| \quad (16)$$

式中: $A = \frac{\pi L \Gamma c E_0}{\omega \lambda} (n_e^3 \gamma_{33} - n_o^3 \gamma_{13})$

在 $\omega=0$ 处归一化后的传输函数为

$$S_n(\omega) = \frac{S(\omega)}{\lim_{\omega \rightarrow 0} S(\omega)} = \frac{2c}{n_o L \omega} \left| \sin \frac{n_o L \omega}{2c} \right| \quad (17)$$

对于特定的传感器, 其折射率和电光作用长度为固定值, 将 A 以 dB 形式表示的传感器频率响应曲线如图 4 所示。据图 4 可得传感器 -3 dB 带宽的理论关系为

$$\frac{n_o L \omega}{2c} = 1.39 \quad (18)$$

传感器 -3 dB 带宽为

$$f = \frac{1.39c}{n_o \pi L} = \frac{0.133}{n_o L} \text{ GHz} \quad (19)$$

对应 1550 nm 光波长时, 传感器 -3 dB 带宽为

$$f = \frac{0.133}{n_o L} = \frac{0.06}{L} \text{ GHz} \quad (20)$$

即传感器 -3 dB 带宽与晶体长度呈反比关系, 对于本文的纯光学无电极结构的 CPI 型传感器, 传感器带宽与晶体长度乘积关系为 6 GHz·cm。在文中的传感器已设计波导长度为 14 mm, 则可依据式(20)计算得出理论带宽为 4.3 GHz。

3 传感器研制与测试

根据设计加工的电场传感器如图5所示,传感器由输入输出光纤、晶体和管壳组成,输入输出均为保偏光纤,铌酸锂封装于绝缘壳体中。封装完的传感器整体尺寸为 20 mm×10 mm×5 mm。

铌酸锂波导通过钛扩散工艺制备,起偏器和检偏器均为由质子交换工艺制备而成的直波导。鉴于现有商用直波导(相位)调制器中波导的光学性能满足传感器需求,传感器直接选用成品钛扩散和质子交换直波导分别作为传感器波导和起(检)偏器。

将传感器置于高低温箱中进行了温度稳定性测试,图6给出了传感器在 10 °C~50 °C 范围内采用文献[19]的偏置控制方法和无偏置控制条件下,输出直流光功率的变化情况对比。可以看出,传感器在通过偏置控制后,输出光功率稳定性有了很大提升,说明传感器偏置稳定性得到了有效提升。

采用标准场法对测量系统进行电学性能测试,如图7所示。标定系统由脉冲源、横电磁波传输室(TEM 小室)、光接收机和示波器构成。信号源输出信号连接至 TEM 小室,产生标准场环境。传感器探头置于 TEM 小室工作区域。由示波器监测 TEM 小室和测量系统输出电压信号。通过标定系统和测量系统输出信号对比实现标定。小室的工作空间高度为 4.2 cm,针对最大 4 kV 的脉冲信号输入时,可产生接近 100 kV/m 的脉冲电场。

采用上升时间约 1 ns、脉宽约 15 ns、最大幅度 4 kV 的双指数脉冲源向 TEM 小室馈入电场进行测试。TEM 小室在 1 GHz 范围内端口电压驻波比小于 1.1,同时传感器为纯无源非金属结构,因此标定过程中小室内部形成的电场不会产生畸变。标定获得的输入输出信号典型波形归一化结果如图8所示。总体上测量系统输出信号与标准信号具有很好的一致性。

基于微型 TEM 小室验证了测量系统的脉冲电场响应性能,受限于脉冲源输出幅度和 TEM 小室的绝缘性能,

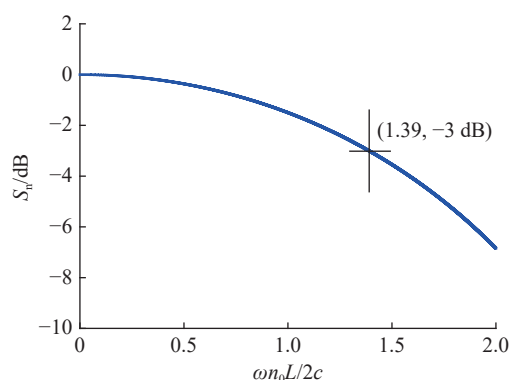


Fig. 4 Frequency response of the optical electric field sensor
图4 光学电场传感器频率响应曲线



Fig. 5 Fabricated integrated optical field sensor for MV/m pulsed electric-field

图5 研制的 MV/m 量级集成光学脉冲电场探头



Fig. 7 Topology relation of calibration system and the calibration scene

图7 标定系统连接关系及标定场景

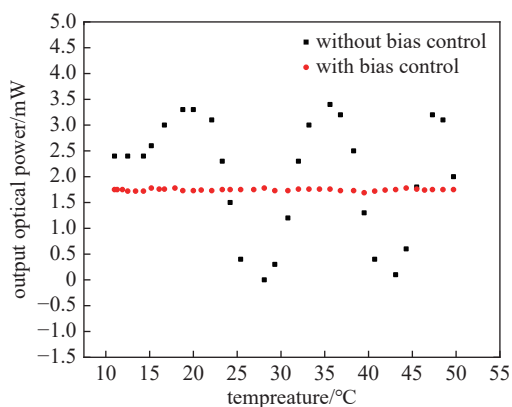


Fig. 6 Comparison of the output power of the sensor under bias control and without bias control at different temperature

图6 不同温度条件下偏置控制和未控制的传感器输出功率对比

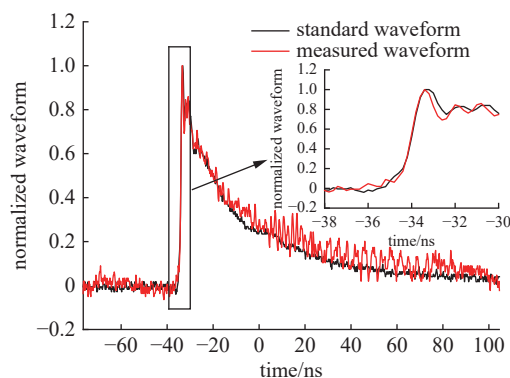


Fig. 8 Normalized results of typical input/output waveform in the sensor calibration

图8 典型输入输出标定波形归一化结果

对于标准强脉冲电场的产生较为困难,不能充分测试其全量程的线性度。但集成光学电场传感器有固定的输入输出传递函数模型,且已得到充分验证。基于光学测量系统的传递函数规律,可对测量系统线性测量范围进行计算,外推其线性测量范围。

5 发次信号的幅度测量结果见表 1。基于正比模型,采用最小二乘法对测量系统线性段进行拟合(拟合优度 R^2 为 0.9999),得到输入输出关系式为

$$E = kV_{\text{out}} \quad (k = 2.36 \times 10^6 \text{ m}^{-1}) \quad (21)$$

参照式(1),测量系统的输出电压为

$$V_{\text{out}} = V_{\text{max}} \sin \frac{\pi E}{E_{\pi}} \quad (22)$$

式中: V_{max} 为最大输出电压。

表 1 转换系数标定数据及计算结果

Table 1 Calibration data and its calculated results

number	input voltage/kV	output voltage/mV	conversion coefficient/(kV·m ⁻¹ ·V ⁻¹)
1	1.08	10.80	2.38
2	1.50	15.20	2.35
3	2.02	20.40	2.36
4	2.52	25.40	2.36
5	2.98	30.00	2.37

标定时,传感器输出的最大光功率为 2.89 mW,锁定偏置后的光功率为 1.45 mW,测量系统噪声约 4 mV,测量系统接收机对应的转换系数为 460 mV/mW,可得最大电压输出范围为±0.67 V,即 V_{max} 取 0.67。当输入电场信号较小时,输出电压为

$$V_{\text{out}} \approx \frac{\pi V_{\text{max}}}{E_{\pi}} E \quad (23)$$

对比式(21)和式(23)可得到传感器半波电场为

$$E_{\pi} \approx k\pi V_{\text{max}} = 4.96 \text{ MV/m} \quad (24)$$

按照半波电场的 1/4 估计其线性测量范围,可得传感器线性测量范围约±1.2 MV/m,测量上限与设计值吻合较好。针对单方向电场测量时,可通过调整系统偏置点至 1/4 最大功率处,将线性测量范围拓展至 2.4 MV/m,满足兆伏每米量级脉冲电场测量需求。

4 结 论

本文针对 MV/m 脉冲电场的测量需求,采用基于晶体电光效应的集成光学测量技术方案,首先分析了其灵敏度和带宽接收特性,推导了带宽和灵敏度的计算方程,分析结果可用于指导传感器设计。特别地,针对 1550 nm 的无天线 CPI 型传感器,得出其带宽随波导长度乘积的量化关系为 6 GHz·cm。设计并研制了纯光学非金属 CPI 型波导结构集成光学强脉冲电场探头,探头体积小于 20 mm×10 mm×5 mm,理论带宽大于 4 GHz,最大测量幅度约±1.2 MV/m,满足 MV/m 脉冲电场测量需求。

参考文献:

- [1] Huang Fanghong, Yan Youjie, Chen Jin, et al. Calibration uncertainty evaluation of D-dot sensors[J]. *Progress in Electromagnetics Research Letters*, 2019, 83: 115-122.
- [2] Cui Zhitong, Mao Congguang, Nie Xin, et al. E-field sensor design for subnanosecond fast transient[C]//2012 6th Asia-Pacific Conference on Environmental Electromagnetics. 2012: 108-110.
- [3] 齐路, 张国钢, 刘竞存, 等. 电磁脉冲 D-dot 电场传感器的设计与优化[J]. *高压电器*, 2018, 54(7): 237-241,247. (Qi Lu, Zhang Guogang, Liu Jingcun, et al. Design and optimization of D-dot E-field sensor for electromagnetic pulse detection[J]. *High Voltage Apparatus*, 2018, 54(7): 237-241,247)
- [4] 王悦, 景萃慧. 渐进圆锥 D-dot 电场传感器频响分析[J]. *安全与电磁兼容*, 2019(2): 21-24. (Wang Yue, Jing Xinhui. Frequency response analysis of asymptotic conical D-dot electric field sensor[J]. *Safety & EMC*, 2019(2): 21-24)
- [5] 郭飞, 王绍飞, 李秀广, 等. 基于渐进圆锥天线的 ns 前沿电磁脉冲电场传感器[J]. *强激光与粒子束*, 2015, 27: 043201. (Guo Fei, Wang Shaofei, Li

- Xiuguang, et al. Development of nanosecond rise time E-field sensor based on asymptotic conical antenna[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2015, 27: 043201)
- [6] 刘卫东, 胡小锋. 瞬态电场时域测试技术的研究现状与展望[J]. 高压电器, 2014, 50(7): 132-138. (Liu Weidong, Hu Xiaofeng. Review of transient electric field measurement in time domain[J]. *High Voltage Apparatus*, 2014, 50(7): 132-138)
- [7] 刘逸飞, 马良, 程引会, 等. 基于光纤传输的灵敏度自校准脉冲电场测量系统[J]. 高电压技术, 2021, 47(4): 1478-1484. (Liu Yifei, Ma Liang, Cheng Yinhui, et al. Pulse electric field measurement system with sensitivity self-calibration based on optical fiber transmission[J]. *High Voltage Engineering*, 2021, 47(4): 1478-1484)
- [8] 崔志同, 聂鑫, 陈鹏. 基于圆柱偶极天线的宽频带电场测量系统[C]//第22届全国电磁兼容学术会议论文选. 2012: 121-126. (Cui Zhitong, Nie Xin, Chen Peng. Wide-band E-field sensor with the dipole antenna[C]//The 22th Chinese National Academic Conference on Electromagnetic Compatibility. 2012: 121-126)
- [9] 孔旭, 谢彦召. 基于光纤技术的电磁脉冲3维电、磁场测量系统[J]. 高电压技术, 2015, 41(1): 339-345. (Kong Xu, Xie Yanzhao. Electric field and magnetic field measuring system for EMP measurement based on fiber technology[J]. *High Voltage Engineering*, 2015, 41(1): 339-345)
- [10] 周开明, 王艳, 谢泽元. 一种宽频带小型化光纤电场测量系统的研制[J]. 信息与电子工程, 2010, 8(1): 30-32. (Zhou Kaiming, Wang Yan, Xie Zeyuan. Design of a wideband and minitype optical fiber metrical system[J]. *Information and Electronic Engineering*, 2010, 8(1): 30-32)
- [11] 石立华, 司荣仁, 李炎新, 等. 微型化光纤传输电磁脉冲传感器研究[J]. 电波科学学报, 2012, 27(6): 1152-1157, 1171. (Shi Lihua, Si Rongren, Li Yanxin, et al. Small size fiber-optic electric field sensor for EMP measurement[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2012, 27(6): 1152-1157, 1171)
- [12] 张晓明, 孟萃, 魏明, 等. 宽频带电磁脉冲电场传感器的研制与测试[J]. 核技术, 2011, 34(4): 299-303. (Zhang Xiaoming, Meng Cui, Wei Ming. Development of a wideband transient electric field sensor[J]. *Nuclear Techniques*, 2011, 34(4): 299-303)
- [13] 刘青, 谢彦召. 高空电磁脉冲作用下埋地电缆的瞬态响应规律[J]. 高电压技术, 2017, 43(9): 3014-3020. (Liu Qing, Xie Yanzhao. Transient response law of buried cable to high-altitude electromagnetic pulse[J]. *High Voltage Engineering*, 2017, 43(9): 3014-3020)
- [14] Tajima K, Kobayashi R, Kuwabara N, et al. Development of optical isotropic e-field sensor operating more than 10 GHz using Mach-Zehnder interferometers[J]. *IEICE Transactions on Electronics*, 2002, E85-C(4): 961-968.
- [15] Ogawa O, Sowa T, Ichizono S. A guided-wave optical electric field sensor with improved temperature stability[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1999, 17(5): 823-830.
- [16] Sawaki I, Nakajima H, Seino M, et al. Thermally stabilized Z-cut Ti: LiNbO₃ waveguide switch[C]//Conference on Lasers and Electro-Optics 1986. 1986: 46-47.
- [17] Zhang Jiahong, Chen Fushen, Sun Bao, et al. A novel bias angle control system for LiNbO₃ photonic sensor using wavelength tuning[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2013, 25(20): 1993-1995.
- [18] Sun Bao, Chen Fushen, Chen Kaixin, et al. Integrated optical electric field sensor from 10 kHz to 18 GHz[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2012, 24(13): 1106-1108.
- [19] Shi Yuewu, Wang Wei, Zhu Zhizhen, et al. A bias controllable birefringence modulation measurement system for subnanosecond pulsed electric field[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2021, 70: 6004311.
- [20] 石跃武, 周辉, 聂鑫, 等. 马赫-曾德尔调制器最佳偏置点自动锁定技术研究[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52: 042301. (Shi Yuewu, Zhou Hui, Nie Xin, et al. Research on the best bias point automatic locking technique for Mach-Zehnder modulators[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52: 042301)
- [21] Peuzin J C. Comment on "domain inversion effects in Ti-LiNbO₃ integrated optical devices" [Appl. Phys. Lett. 46, 933 (1985)] [J]. *Applied Physics Letters*, 1986, 48(16): 1104.
- [22] 李金洋, 逯丹凤, 祁志美. 铌酸锂波导电光重叠积分因子的波长依赖特性分析[J]. 物理学报, 2014, 63: 077801. (Li Jinyang, Lu Danfeng, Qi Zhimei. Analyses of wavelength dependence of the electro-optic overlap integral factor for LiNbO₃ channel waveguides[J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, 63: 077801)
- [23] 石跃武, 周辉, 聂鑫, 等. 集成光学电场探头测量 HEMP 的系统误差分析[J]. 强激光与粒子束, 2015, 27: 073202. (Shi Yuewu, Zhou Hui, Nie Xin, et al. Analysis of system error for HEMP measurement using integrated optical E-field sensors[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2015, 27: 073202)