

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2017.11.005

拉锥光纤-平板波导耦合电场测量传感器的参数优化与结构改进

杨帆, 陈思远, 王涉, 陈洋

(重庆大学电气工程学院, 重庆 400044)

摘要:对一种拉锥光纤-平板波导耦合器(TFSC, tapered fiber-slab coupler)测量电场的方法进行了研究,详细讨论了TFSC的参数对传播性能的影响,为设计TFSC传感器结构参数打下了理论基础。在RsoftBPM中搭建仿真平台进行仿真,结合模式耦合理论,定性分析了耦合器结构参数对测量精度、测量范围以及设备尺寸的影响;在此基础上提出了对该传感器提升测量精度或者增大测量范围的设计原则,并给出一组设计实例;分析了耦合器对原电场的畸变作用,并结合仿真对耦合器结构进行了改进。

关键词:TFSC;模式耦合;电光效应;电场传感器

中图分类号:TM12

文献标志码:A

文章编号:1000-582X(2017)11-037-11

Parameters optimization and structure improvement of the tapered fiber-slab waveguide coupled electric field measurement sensor

YANG Fan, CHEN Siyuan, WANG She, CHEN Yang

(College of Electrical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, P.R.China)

Abstract: The method of measuring the electric field of a tapered fiber-slab coupler(TFSC) is studied. The influence of the parameters of TFSC on the propagation performance is discussed in detail in order to design a TFSC sensor with better parameters. Firstly, the simulation platform is simulated in RsoftBPM, and the influence of the coupling parameters on measurement accuracy, measurement range and size of the equipment is analyzed qualitatively according to the coupled-mode theory. Then, the design principle for the sensor of improving measurement accuracy or increasing measurement range is proposed and a set of design examples is given. Finally, the distortion of the original electric field is analyzed, and the coupler structure is improved by simulation.

Keywords: TFSC; mode coupling; electro-optic effect; electric field sensor

电场测量在诸多科学研究和工程技术领域具有重要意义,在国防、医学、生物等研究领域特别是在电力系统、电磁兼容及微波技术等应用领域具有广泛应用。

在电气工程领域中,电力系统运行状态监测、高电压试验研究及电晕放电等现象研究需要对电场进行测

收稿日期:2017-06-13

基金项目:第九届国家级大学生科研创新训练项目(2015061117)。

Supported by National University Students Research and Innovation Training Program(2015061117)。

作者简介:杨帆(1980—),男,重庆大学电气工程学院教授,博士生导师,主要从事输变电设备电磁热耦合场、多物理场的计算应用研究,yangfancqu@gmail.com。

量;在电磁方面的研究,电场测量可以为检验电场理论计算是否准确提供参考,为许多难以计算的电场环境提供测量数值^[1];在电磁兼容科研中,电场测量可用于检测电子、电气设备的对外电磁干扰与辐射,以及研究环境电场对电子仪器运行的影响。其他所测电场还有换流站阀厅内的直流电场,输电线路下方或绝缘子表面的工频电场,长间隙放电中的 μs 级暂态电场,气体绝缘变电站中特快速暂态过电压产生的 ns 级暂态电场等^[2]。

从 20 世纪 80 年代,随着光学传感和测量技术的进步,光纤传感器迅速成为电场测量的有效手段。Koo 等^[3]首先提出了基于 PVF_2 压电材料和相位漂移补偿技术的第一代干涉型电场传感器^[3]。2004 年以来,清华大学电磁环境研究室开始基于集成光学技术的光电集成电场传感器的研究。2011 年,西安交通大学测控技术与仪器教研室对利用电光效应进行电场测量也进行了大量的研究,提出了一种新型光纤传感测量的技术思路,即利用拉锥光纤平板波导耦合器(TFSC, tapered fiber-slab coupler)进行电场测量^[4-5];郑州大学激光与光电信息技术重点实验室利用相似的结构对液体折射率进行测量,也取得了不错的效果^[6]。国外也有利用类似结构设计了温度传感器^[7]。但是,文献[4-7]选取的样本点数都很少,只能表现出局部范围内相关结构参数对耦合器传输特性影响的大致趋势。而往往微纳光纤的制作和封装不能保证参数的一致性,从而影响耦合器的性能。因此,详细地研究 TFSC 各个结构参数与耦合器传输特性之间的关系是非常必要的。

基于此,文章针对 TFSC 电场测量传感器的实际工程设计中的问题进行了深入研究,针对参数和结构的优化进行分析。

1 TFSC 电场传感器的结构

为使耦合器具有良好的机械特性及便于封装,文中设计了一种 TFSC 结构,如图 1 所示。耦合器由拉锥光纤和电光晶体材料的平板波导组成,经 V 型槽固定。拉锥光纤由 SMF-28 单模光纤熔融拉制而成,腰部半径在微米级别;平板波导选用铌酸锂晶体(LiNbO_3),它具有稳定的物理化学性质,容易加工,可使得传播方向上具有最大的电光系数,实现平板波导和锥形光纤的最大耦合。V 型槽的衬底材料选为单晶硅,掩蔽膜选用 SiO_2 材料,经湿刻法腐蚀制成。设置 V 型槽的倾斜角为 54.74° ^[8],根据所放置光纤的直径设置其腐蚀深度以调整光纤拉锥区和电光晶体的距离,待测量电场垂直作用于电光晶体表面。

TFSC 的平面结构图如图 2 所示。在弱耦合条件下,任何结构参数的改变均会导致空间电磁场的边界条件发生改变,进而影响耦合器的传播模式及模式耦合情况^[15]。文献[13]建立了纤芯-波导耦合器的数学模型,该模型是关于场量的 2 个一阶联立微分方程组。该方程组包含 3 个耦合参数,这 6 个耦合参数均是晶体的纵向长度 L 、锥形光纤腰部直径 R 、腰部耦合间距 g_s 、光学胶折射率 n_e 这 4 个耦合器结构参数的输出量。

因此,以 L 、 R 、 g_s 和 n_e 作为变量,就可以确定耦合器的结构,从而详细地讨论 TFSC 结构对其传输特性的影响^[4,13]。

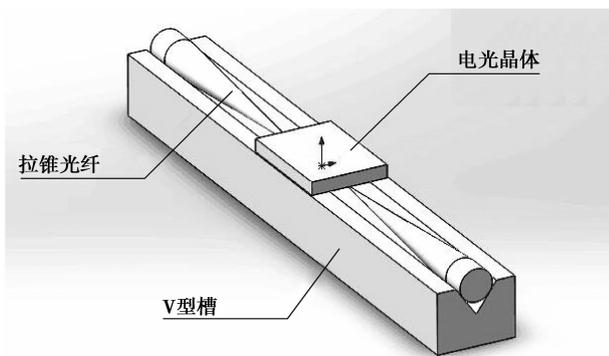


图 1 TFSC 电场传感器结构图
Fig.1 Structure of TFSC detector

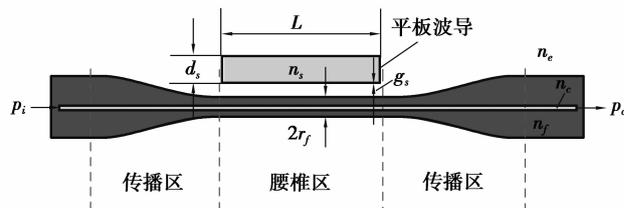


图 2 TFSC 平面结构图
Fig.2 Plan structure diagram of TFSC

2 TFSC 测量原理分析

锥形光纤纵向上的不均匀性会导致波导内传播模式正交性的破坏,不同传播模式之间发生能量的纵向耦合,光的传播模式发生改变。在锥形区域,光束将在一个直径从大至小的光纤锥体中传播,纤芯导模的模场半径逐渐从小变大。由于光的反射次数逐渐增加,倏逝波的穿透深度逐渐加大^[9],当纤芯归一化频率降至 $V=1$ 时,纤芯已不能约束波导模的传输,光束将由原包层波导传输,形成“包层-外介质”模场,产生强倏逝场^[10-11]。这就是研究采用锥形微纳光纤的主要原因。光纤中的光极易受外界环境的影响,耦合器十分灵敏。

在腰锥区域,当光纤的拉锥区和平板波导的相位常数相近或相同时,锥形光纤和平板波导将会发生横向耦合,光纤中的一部分能量会耦合到平板波导之中。由于弱耦合条件下,TFSC 结构中任何参数的改变将会导致区域中 Maxwell 方程的不同,耦合系数也将会改变^[12]。

以上物理过程可以在 Beamprop 仿真中得到验证,如图 3 所示。由光功率分布仿真可以清楚地看到,当光在锥形过渡区传播时,纤芯内光的能量逐渐增大,形成包层-外介质模场;当光传播到腰锥区时,与平板波导发生横向耦合。在光纤一端加一特定频率的激光源,传播效率随光源频率的不同而变化,表现出一定的规律^[13],如图 4 所示。

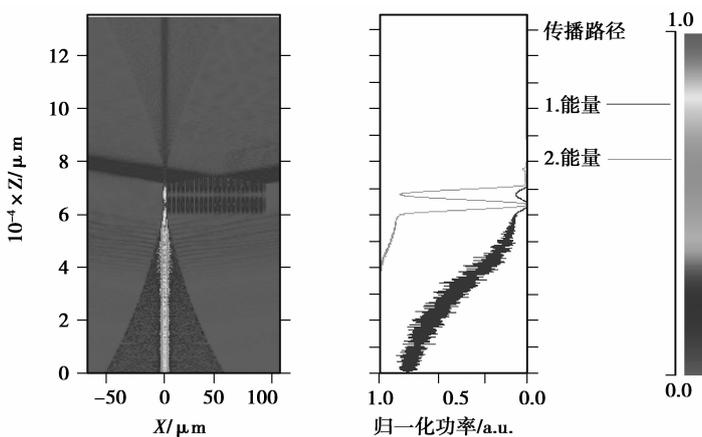


图 3 Beamprop 光功率分布仿真

Fig.3 Power distribution Simulation by Beamprop

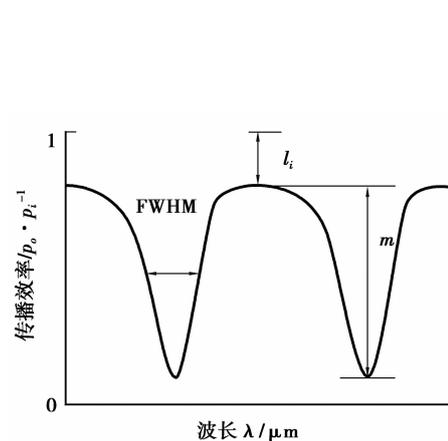


图 4 TFSC 传感器的传输特性曲线^[4]

Fig.4 Transmission characteristic curve of TFSC detector

利用传输特性曲线在产生有效耦合的波长范围内所表现出来的近似的线性特性,TFSC 可以准确地进行电场的测量。当待测量电场加于光纤拉锥区、垂直穿过平板波导时,由于电光晶体的 Pockels 效应,平板波导的折射率发生变化,改变了 TFSC 结构的耦合系数,使得耦合器的传输特性的中心频率发生偏移,从而特定频率的光经耦合器的传输效率将发生变化。根据耦合器的传输效率,就可以得到待测量电场的场强。

TFSC 的结构参数均会导致不同的耦合器性能。在 RsoftBPM 中搭建仿真平台,选取拉锥长度、腰锥半径、平板波导厚度以及耦合油折射率为变量,进行扫描仿真,设计出具有插入损耗低、半宽高(FWHM, full width at half maximum)小、耦合深度深的特性的耦合器。耦合区的线性特性越好,耦合深度变化越快,测量的精度就越高。

3 TFSC 参数特性仿真与分析

TFSC 电场传感器的参数将影响测量精度、测量范围,从而改变传感器的性能以及应用领域。由于测量应用的是传输特性曲线中的近似线性带,在耦合深度不变化的情况下,线性带斜率增大,则电场测量精度的提高,但将相应地缩小测量的最大范围;反之,则测量精度降低。耦合深度越深,在测量精度不变的情况下,测量的范围将增大。将结合模式耦合理论,通过 Rsoft 软件中的 Beamprop 工具,模拟并分析传感器参数改变对测量的影响,从而确定参数选取与搭配原则。

首先通过 Beamprop 构建拉锥光纤-平板波导电场传感器如图 5 所示,电光晶体为长方体,锥形光纤锥区

采用指数衰减模型^[14]。

3.1 晶体纵向长度对传输特性的影响

电光晶体的纵向长度对耦合深度影响显著。类似双光纤耦合器,在耦合器产生有效耦合的前提下,当腰锥区的长度为耦合长度 $L = \pi/2K$ (K 为耦合器的等效耦合系数) 的奇数倍时,耦合到平板波导中的能量达到最大^[15],如图 6 所示。而由于纵向长度的改变不会影响模式的横向耦合,因而当 TFSC 其余参数固定时,耦合器的耦合长度不发生变化,即产生最大耦合的光波长不变。

由于拉锥工艺的限制,一般拉锥光纤腰部长度控制在 1~2 cm 左右,而文中研究的电场传感器中电光晶体与光纤腰部紧密耦合,需要进行长度的匹配。综上,在传感器的设计中,晶体纵向长度需要被列为一个重要的影响因素。下文将半高宽、插入损耗、耦合深度以及晶体纵向长度作为评价 TFSC 传感器特性的 4 个指标,通过控制变量法改变分析某一参数的变化对 4 个指标的影响,从而总结得到传感器设计的基本原则。

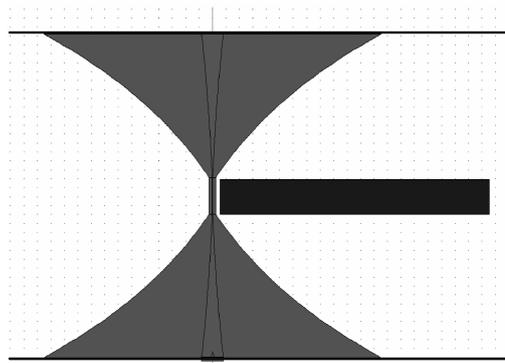


图 5 TFSC 电场传感器的模型

Fig.5 Model of TFSC detector

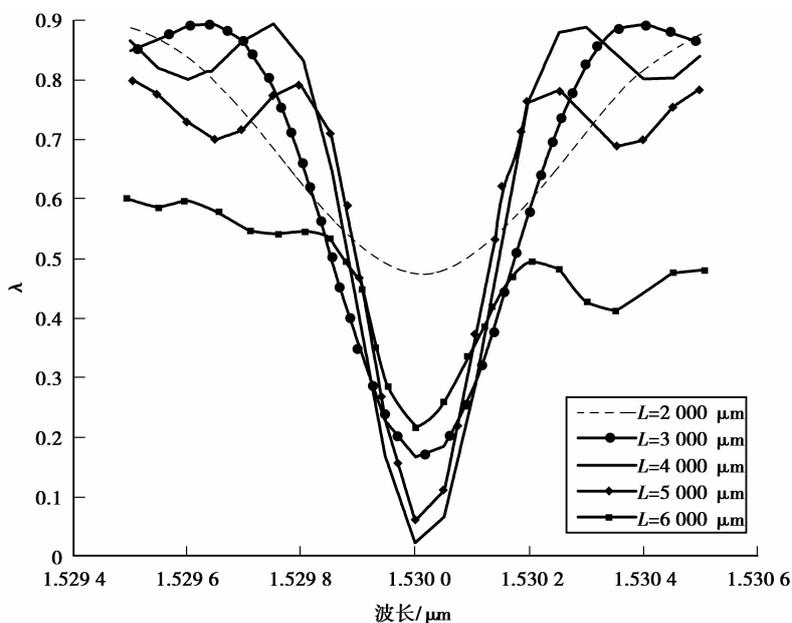


图 6 传输特性曲线

Fig.6 Transmission characteristic curve

3.2 光纤腰部直径对传输特性的影响

图 7 给出了不同腰部直径下耦合其的传输特性曲线,图 8 给出了传输特性的半高宽、插入损耗、耦合深度和所需最小晶体长度。由图 8 可以发现,当光纤拉锥区腰部半径增大时,光纤-波导共振波长上移;随着半径增大,特性曲线共振区的半高宽逐渐减小,插入损耗在半径增加到 $2.5 \mu\text{m}$ 之前下降迅速,后稍微回升。总体耦合深度在半径到达 $2.5 \mu\text{m}$ 之后几乎不再变化而趋于稳定。从而由上述的特性可以得到,腰部拉锥半径的增大有利于提高传感器的测量精度,但从另一方面将会限制住传感器的最大有效工作电场,即传感器的测量范围。而从图 8(d) 电光晶体最小纵向长度这一指标来看,半径过大会使得传感器的体积增大,并将由于锥角的过小而加大拉锥光纤的制作工艺难度;再者,由于本身光源的波长既存在误差,当半高宽小到一定程度后,并不能带来精度的提高反而可能导致测量失败。

从制作工艺和性能两方面综合考虑,所设计的传感器的拉锥光纤腰部直径应该落在 $1.5 \mu\text{m} \leq R \leq 4 \mu\text{m}$ 范围内。

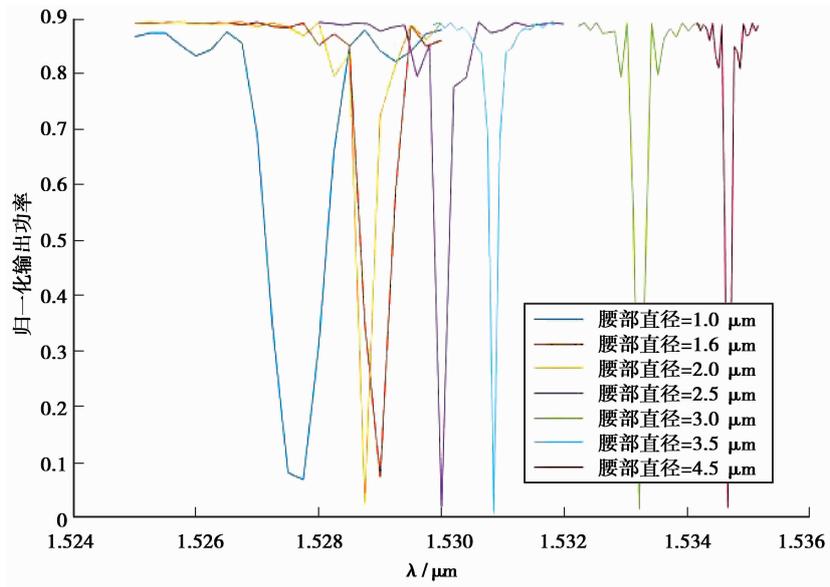


图 7 传输特性曲线

Fig.7 Transmission characteristic curve

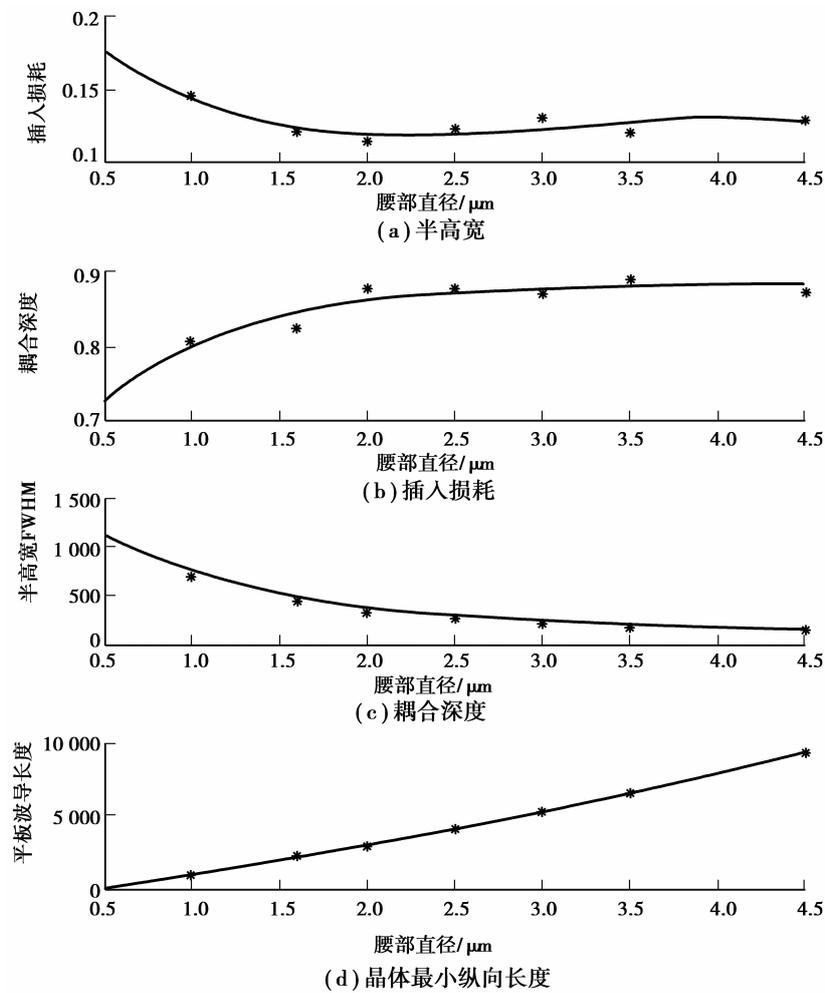


图 8 光纤腰部直径对传输特性的影响

Fig.8 Impacts of the waist diameter of tapered fiber

3.3 腰部耦合间距对传输特性的影响

由图 9 可以发现,随着距离的增加,半高宽和插入损耗都减小,测量精度增高。耦合深度也逐渐增大,但 $1.5 \mu\text{m}$ 是一个拐点,过了 $1.5 \mu\text{m}$ 后,耦合深度的增速放缓。这是比较好理解的,两波导距离越近,模场重叠越严重,耦合现象越明显。

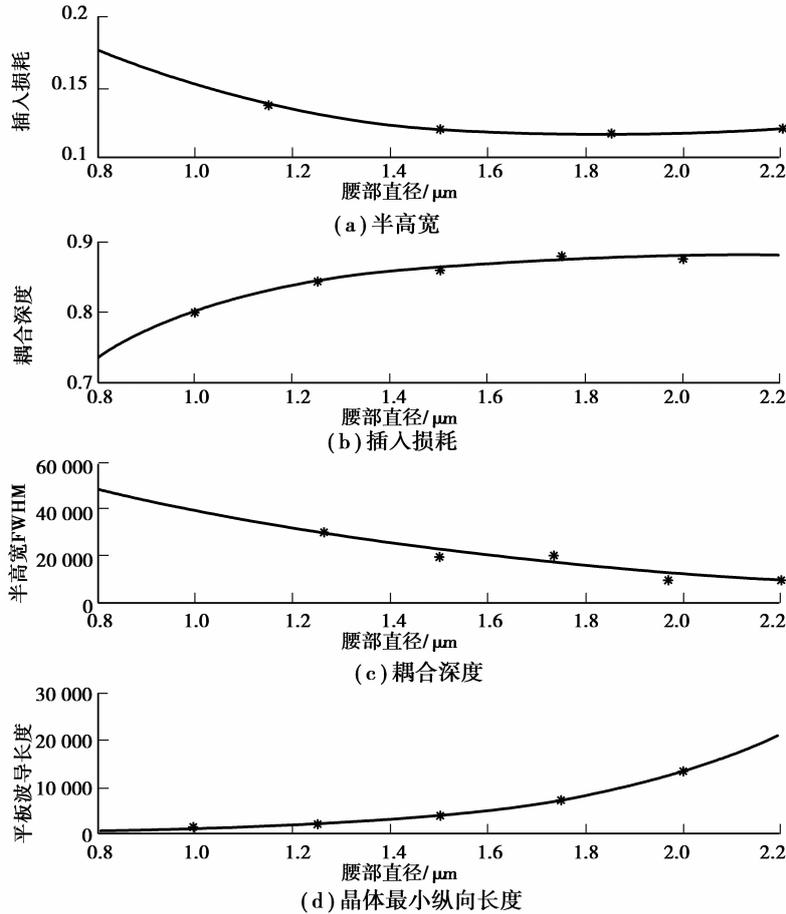


图 9 平板与光纤的距离对传输特性的影响

Fig.9 Impacts of the distance between fiber and slab

值得注意的是,如图 9(d)所示,电光晶体最小纵向长度随着距离的增大有近似指数的增长趋势, $2 \mu\text{m}$ 时已经接近 14 mm ,此时拉锥光纤的锥角已经极小,设备体积很大而且拉锥制造困难。因此,在选择 l_d 的时候,如果 $l_d \leq 1.5 \mu\text{m}$ 时,优先满足传感器的精度,而当 $l_d > 1.5 \mu\text{m}$ 要求应该兼顾或者优先考虑传感器的体积和制作工艺。

3.4 光学胶对传输特性的影响

由图 10 可以发现, n_b 越接近包层折射率(约 1.44),半高宽就越大,测量的精度下降,测量范围增大,耦合深度变化不大;同样地,精度的提高会带来光纤的拉锥难度以及传感器的体积增大。

3.5 传感器参数优化的设计原则

上文通过软件仿真模拟的方式分析了 TFSC 电场测量传感器结构参数带来的对测量精度和范围的影响。针对不同电场条件的 TFSC 传感器的参数整定,表 1 对上文的结果归纳总结,提出表 1 中的设计原则。

表 1 传感器参数优化设计原则

Table 1 the design rules for TFSC parameters

提升精度	控制设备尺寸
增大拉锥光纤腰部直径	减小拉锥光纤腰部直径
增大平板与波导的间隙	减小平板与波导间的间隙
采用低折射率的光学胶	采用高折射率的光学胶

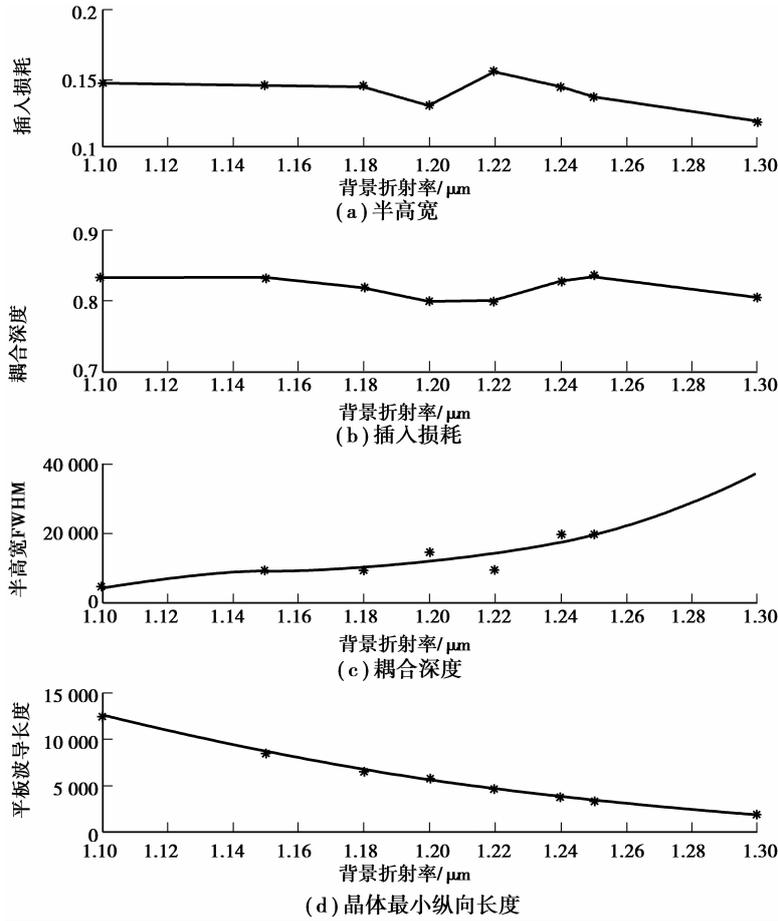


图 10 背景折射率(耦合油)对传输特性的影响

Fig.10 Impacts of the distance between fiber and slab

4 传感器的实例设计与仿真分析

根据上节所分析的 TFSC 传感器的参数对于电场测量的影响以及传感器的设计原则,根据实际的工业需求,可以给予适当的参数设计专用的电场传感器。假设所加电压为 E ,电光晶体的折射率极为与外加电场相关的函数 $n(E)$ 。

$$n(E) = n_0 - \frac{1}{2}\gamma n^3 E - \frac{1}{2}h n^3 E^2 + \dots,$$

式中: γ 和 h 分别代表一次电光(Pockels)系数和二次电光(Kerr)系数; n_0 表示未加电场时的折射率。忽略二次电光系数,有

$$\Delta n(E) \approx \frac{1}{2}\gamma n^3 E。$$

在仿真中加入电场条件,即可分析任一组参数下传感器的工作范围。以如下参数的传感器为例,原光纤为 SMF-28,包层直径为 $125 \mu\text{m}$,折射率为 1.446,纤芯为 $8.14 \mu\text{m}$,折射率为 1.450 21;腰部直径为 $2.5 \mu\text{m}$,锥角为 0.07° ,耦合距离 $1.5 \mu\text{m}$,耦合介质折射率 1.3,晶体纵向长度 12 mm。

当电场从 $0 \sim 60 \text{ kV/cm}$ 变化时,传感器的输出端光功率变化如图 11 所示。图中实线为输入电场变化时,输出端光强的特性曲线,虚线为该特性曲线腰部区域的线性拟合,可以发现在原曲线腰部区域体现了良好的线性特性,区域内斜率最大且基本不变,便于传感器的矫正整定。当电场高于这个区域,则出现饱和特性,将导致测量失真。将线性区域作为传感器工作范围,可以得到该参数的电场传感器可以较准确测量 $20 \sim 40 \text{ kV/cm}$ 的电场。此时可以通过改变输入光的波长,来平移特性曲线,使得不加电场时,传感器的输出对准曲线腰部中心,即约图中 30 kV/cm 处,使得传感器可以准确测量强度为 10 kV/cm 的电场,可将其应用于交流电场的测量。由于电磁波以光速传播,电光效应的反应速度极快,通常来说,电光传感器能够测量 GHz 频率的电场变化,再加上该传感器尺寸小、可远程操作的优点,因而该参数下的传感器可适用于各种大气压下

空气放电的测量,可以广泛使用。

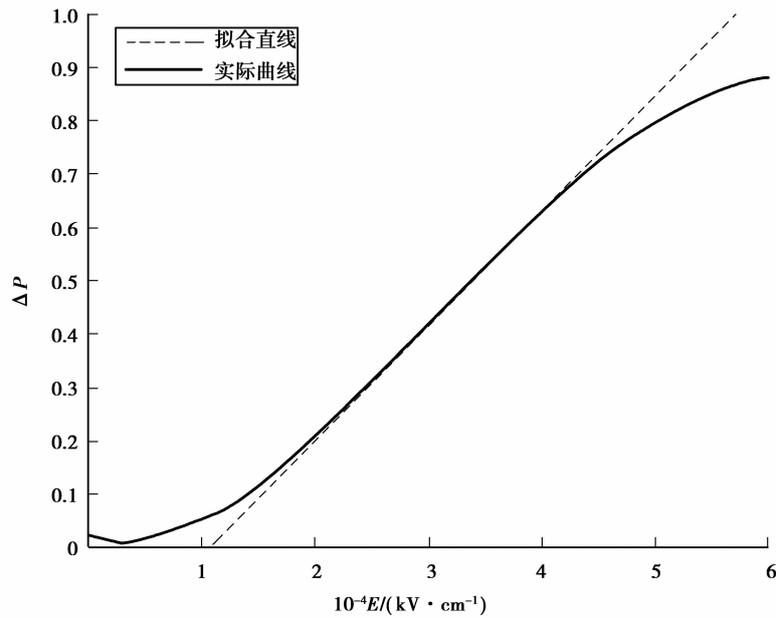


图 11 电场强度与传输功率差的关系

Fig.11 The relationship between the electrical field and the difference on transmission power value

5 传感器对电场的畸变

各种电场测量装置在放入电场环境中进行测量的时候,或多或少都会对原电场产生畸变。电场的畸变常带来电场测量不准确,甚至测量设备安全等问题,因此传感器对空间电场的影响不可被忽视。

使用 Comsol Multiphysics 软件对 TFSC 传感器进行仿真,传感器的结构参数与第 4 节相同,在传感器邻近的空间中设置平板电场,这是由于 TFSC 的结构很小,实际中所加的电场近似均匀。板间平均场强 10 kV/cm,为第 4 节所设计传感器可测量最大幅值电场。当不加入额外耦合介质,即传感器间隙为空气时,可以发现,在腰部区域,V 型槽与电光晶体和光纤间的距离较远且本身畸变较小,不会影响电光晶体周围的电场,因此忽略 V 型槽的结构影响;而在电光晶体的边缘与拉锥光纤的空气间隙中,电场被严重畸变,最高已接近 45 kV/cm,高于 30 kV/cm 的空气击穿电压,将产生局部微放电,引起传感器的发热和损坏。因此该结构必须进行调整,以保证设备的安全稳定工作。

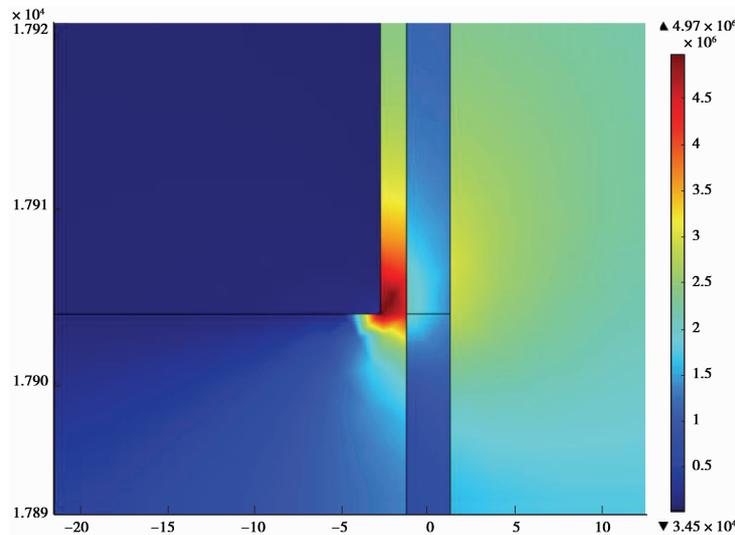


图 12 顶角电场分布的局部放大图

Fig.12 An enlarged view of an apex angle of the electric field distribution

从图 12 可以看出,电光晶体立方体的顶角曲率大,产生尖端放电。在技术条件允许的情况下,通过倒角或圆角工艺,可以减小曲率,使得电场分布均匀,减小最大场强,如图 13 所示。

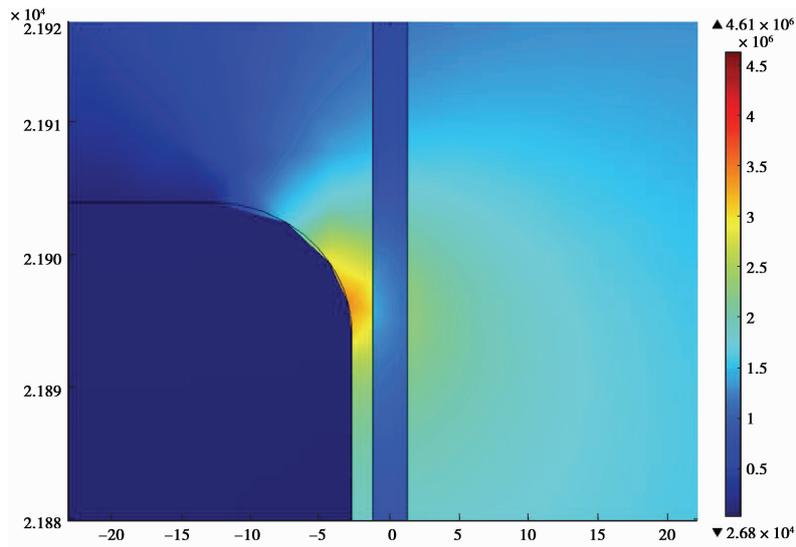


图 13 圆角处理后电场分布的局部放大图

Fig.13 Fillet treated partial enlarged view of the electric field distribution

然而此方法并不能从根本上减小传感器对电场的畸变,保证传感器的安全性。通常来说,电光晶体和拉锥光纤可以用光学胶粘合固定如果使得光学胶充满整个间隙,作为光纤与波导间的耦合介质,由于光学胶的介电常数大于空气且略大于光纤,电场畸变被很大程度抑制,电场变得更加均匀,最高的电场强度出现在光纤中,幅值为 15 kV/cm(如图 14 所示),传感器的安全稳定性得到了很大提高。并且电光晶体周边电场与远端电场强度相差不大,因此该传感器的测量准确性较好。

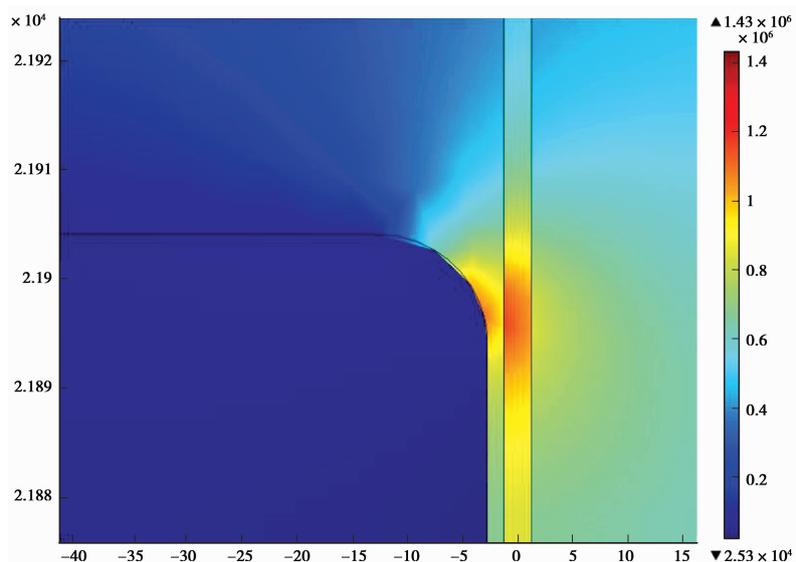


图 14 应用光学胶后电场分布的局部放大图

Fig.14 Enlarged view after applying the electric field distribution of the optical glue

6 结 语

介绍了 TFSC 结构和电场传感器的测量装置,并分析了其基本原理。对 TFSC 的传感器的特性参数进行了 Rsoft 仿真,分析了电光晶体纵向长度、光纤腰部直径、平板与光纤的距离以及背景折射率对测量精度、

测量范围以及设备尺寸的影响。在此基础上,提出了传感器的参数优化设计原则,并给出了一组实例说明提升精度或者增大测量范围的设计方法。后分析了该传感器对空间电场的畸变情况,提出了均匀电场的方法,对进一步的研究具有一定的指导意义。

参考文献:

- [1] 陈吉.交流电场对导线覆冰及其电晕起始特性的影响研究[D].重庆:重庆大学,2014.
CHEN Ji. Study on the influence of the AC field on conductor icing and corona onset characteristics[D]. Chongqing: Chongqing University, 2014. (in Chinese)
- [2] 王晓扬.干涉型光纤微弱电场传感器研究[D].上海:上海交通大学,2008.
WANG Xiaoyang. Study on the fiber-optic interferometric sensor detecting weak electric-field[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2008. (in Chinese)
- [3] Koo K P, Sigel G H. An electric field sensor utilizing a piezoelectric polyvinylidene fluoride (PVF2) film in a single-mode fiber interferometer[J]. *Quantum Electronics*, 1982, 18(4): 670-675.
- [4] Dong S, Ding H, Liu Y, et al. Investigation of evanescent coupling between tapered fiber and a multimode slab waveguide[J]. *Applied Optics*, 2012, 51(10):152.
- [5] Dong S, Han C, Ding H, et al. An all-fiber electric field sensor based on tapered fiber-slab waveguide coupler[M]// *Instrumentation Science & Technology*. 2012:1209-1212.
- [6] 李立伟.锥形光纤倏逝场液体传感器的研究[D].郑州:郑州大学,2012.
LI Liwei. Investigation on the tapered fiber evanescent-field of liquid sensors[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2012. (in Chinese)
- [7] Jung W G, Kim S W, Kim K T, et al. High-sensitivity temperature sensor using a side-polished single-mode fiber covered with the polymer planar waveguide[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2001, 13(11):1209-1211.
- [8] 郝永芹.光纤定位硅 V 型槽的设计与制作[D].长春:长春理工大学,2002.
HAO Yongqin. The design and manufacture of fiber coordination silicon V groove[D]. Changchun: Changchun University of Technology, 2002. (in Chinese)
- [9] 薛春荣.熔锥光纤的特性研究[J].*激光与红外*, 2006, 36(9):886-888.
XUE Chunrong. Research of the Tapered Fiber Properties[J]. *Laser & Infrared*, 2006, 36(9):886-888. (in Chinese)
- [10] 王海林,黄蔚村,洪新华.1550nm 单模锥形光纤模场的演化特性[J].*强激光与粒子束*, 2012, 24(5):1052-1056.
WANG Hailin, HUANG Weicun, HONG Xinhua. Mode field evolution in 1550 nm single-mode tapered fiber[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2012, 24(5):1052-1056. (in Chinese)
- [11] 薛春荣,祝生祥,李锐,等.锥形光纤传输特性的检测与分析[J].*光电子·激光*, 2003, 14(7):772-774.
XUE Chunrong, ZHU Shengxiang, LI Rui, et al. Test for the transforming property of tapered fiber[J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2003, 14(7):772-774. (in Chinese)
- [12] Marcuse D. Investigation of coupling between a fiber and an infinite slab[J]. *Lightwave Technology Journal of*, 1989, 7(1):122-130.
- [13] Johnstone W, McCallion K, Moodie D, et al. In line fibre optic electric field sensing technique without interruption of the fibre[J]. *IEE Proceedings - Science, Measurement and Technology*, 2002, 142(2):109-113.
- [14] Birks T A, Li Y W. The shape of fiber tapers[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2002, 10(4):432-438.
- [15] 李玉权,崔敏.光波导理论与技术[M].北京:人民邮电出版社,2002.
LI Yuquan, Cui Min. Theory and technology of optical waveguide [M]. Beijing: Posts and Telecommunications Press, 2002. (in Chinese)