

基于混合粒子群优化算法的 ZnO 镀膜光纤传感器的相位偏移

刘 奇¹, 周 力², 周 雅²

¹武夷学院数学与计算机学院, 福建 武夷山 354300;

²南昌航空大学信息工程学院, 江西 南昌 330063

摘要 建立了氧化锌镀膜光纤传感器中传输光相位偏移的优化模型, 采用混合粒子群优化算法对该模型进行优化。仿真结果表明, 利用该算法可得到传输光相位偏移量的优化值。分析了光纤传感器相关参数对传输光相位偏移的影响; 比较了优化后相位偏移的理论值与实验值, 发现二者基本一致。

关键词 光学设计; 光纤传感器; 相位偏移; 混合粒子群优化算法

中图分类号 TN253 文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201737.0122002

Phase Shift of Optical Fiber Sensor Coated with ZnO Based on Hybrid Particle Swarm Optimization Algorithm

Liu Qi¹, Zhou Li², Zhou Ya²

¹ College of Mathematics and Computer, Wuyi University, Wuyishan, Fujian 354300, China;

² School of Information Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang, Jiangxi 330063, China

Abstract An optimization model for phase shift of transmission light in optical fiber sensor coated with ZnO is established, and the model is optimized by the hybrid particle swarm optimization algorithm. Simulation results show that the optimal value of phase shift of transmission light is obtained by the algorithm. The effect of relevant parameters of the optical fiber sensor on phase shift of transmission light is analyzed. The theoretical value and the experimental value of phase shift are compared, and they are basically consistent.

Key words optical design; optical fiber sensor; phase shift; hybrid particle swarm optimization algorithm

OCIS codes 220.4830; 230.2090; 060.2370

1 引 言

氧化锌(ZnO)镀膜光纤传感器属于全光器件的一种^[1], 该类器件具有驱动能量小、结构简单、尺寸较小等优点, 不仅应用于国防、航空和航天领域, 而且也广泛应用于民用领域, 如建筑、水利和桥梁等方面^[2-9], 因此光纤和光器件组成的全光系统已成为一种发展趋势。关于 ZnO 镀膜光纤传感器的研究主要包括两大热点。第一个研究热点是对器件的物理模型及传输特性的理论研究。周力等^[10-11]着重分析了 ZnO 镀膜光纤传感器的工作原理; Snyder^[12]研究了光纤传感器中传输光的相位移动与光纤折射率的关系; Kim 等^[13]研究了传输信号与反射信号无法同步获取的问题。第二个研究热点是器件制作方面的研究, 包括镀膜材料对器件性能的影响分析和设备各参数如何获得最佳匹配问题的分析。周雅等^[14]利用硝酸锌单盐水溶液体系在铜基上进行阴极电沉积, 得到氧化锌镀膜, 获得了一种稳定、实用的电沉积配方; 赵雷等^[15]采用了最小均方差法确定最优反射率; 刘奇等^[16]对 ZnO 镀膜光纤传感器的耦合效率进行了优化, 分析了器件参数对耦合效率的影响。镀膜光纤的涂层设计与制作涉及较多方面的问题, 传输光相位偏移的最优化成为需要解决的主要问题之一^[17]。

收稿日期: 2016-08-01; 收到修改稿日期: 2016-08-29

基金项目: 福建省教育厅科技项目(JA12322)、武夷学院青年基金(XQ201109)

作者简介: 刘 奇(1982—), 男, 硕士, 讲师, 主要从事光纤通信与传感方面的研究。E-mail: lqdnxb@163.com

本文研究了 ZnO 镀膜光纤传感器制作中传输光的相位偏移以及各参数如何获得最佳匹配的问题。对相位偏移量的物理模型进行了优化,并进一步研究了优化后的相关参数与传输光相位偏移的内在作用机理。采用了一种混合粒子群优化算法(HPSO)对传输光相位偏移量的物理模型进行优化,该算法在基本粒子群算法(PSO)的基础上引入遗传算法交叉算子的概念^[18],解决了相位偏移量的复杂约束问题。

2 ZnO 镀膜光纤传感器的相位偏移优化模型

图 1 为 ZnO 镀膜光纤传感器的二端口网络等效模型。图中 Z_i 为设备的输入阻抗, Z_o 为设备的输出阻抗, Z_f 为光纤层输入阻抗, F_1 、 F_2 分别为压电层内外表面所受的压力, ν_1 、 ν_2 分别为光信号进入压电层内外表面的传播速度, V 、 I 分别为压电层两端的电压和电流。光纤镀有偏振压电层并夹在同轴薄膜金属电极之间,当电极外加电场时,电场频率的变化会引起张力的扰动,此时谐振腔长度、半径和光纤折射率都会发生变化,光纤中传输光的相位也因此发生变化。相位越大,调制度越高。相位变化量可以表示为

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda}n\Delta l + \frac{2\pi}{\lambda}l\Delta n + \frac{\partial\beta}{\partial R}\Delta R, \quad (1)$$

式中 λ 为波长, n 为折射率, l 为谐振腔长度, R 为光纤半径, Δl 为谐振腔变化的长度, Δn 为折射率的变化量, ΔR 为光纤半径的变化量。 Δn 对相位变化的影响大于 ΔR 和 Δl 对相位变化的影响,因此可将(1)式改写为

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda}l\Delta n. \quad (2)$$

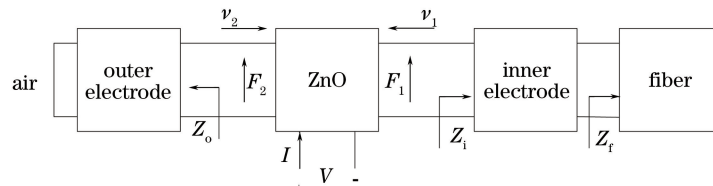


图 1 ZnO 镀膜光纤传感器的二端口网络等效模型

Fig. 1 Two-port network equivalent model of optical fiber sensor coated with ZnO

折射率变化的笛卡儿方程可表示为

$$\begin{aligned} \Delta n_1 &= -0.5n^3(p_{11}S_1 + p_{12}S_2 + p_{13}S_3) \\ \Delta n_2 &= -0.5n^3(p_{12}S_1 + p_{11}S_2 + p_{12}S_3), \\ \Delta n_3 &= -0.5n^3(p_{13}S_1 + p_{13}S_2 + p_{11}S_3) \end{aligned} \quad (3)$$

式中 Δn_k 为 x 、 y 、 z 方向上的折射率变化, $k=1,2,3$; p_{ij} 为光纤的光弹性系数, $i, j=1,2,3$; n_k 为 x 、 y 、 z 方向上的折射率; S_1 和 S_2 分别为光纤在 x 、 y 方向上受到的径向张力, S_3 为光纤在 z 方向上受到的轴向张力。由于光纤为圆柱体,根据轴对称性,可令 $S_1=S_2=S_r$ 且 $S_3=0$,采用球面公式可得折射率的变化量为

$$\Delta n = -0.5n^3(p_{11} + p_{12})S_r. \quad (4)$$

将(4)式代入(1)式,可得

$$\Delta\phi = -\frac{\pi}{\lambda}n^3(p_{11} + p_{12})S_rl. \quad (5)$$

根据电磁理论推理,单位体积声波功率可表示为 $\frac{P_a}{V} = \frac{TS_r}{2}$ (T 为应力), 声波束体积 $V = \nu_a A$, 根据胡克定律: $T = cS_r$, 整理可得

$$\frac{P_a}{\nu_a A} = \frac{cS_r^2}{2}, \quad (6)$$

式中 P_a 为声功率, ν_a 为声音在光纤中传播的速度, c 为弹性系数, A 为声波束的横截面积。

已知 $\nu_a = \sqrt{c/\sigma}$, 声阻抗 $Z = \sigma\nu_a$, σ 为介质密度。根据(6)式,可得

$$S_r = \sqrt{\frac{2P_a}{Z\nu_a^2 A}}. \quad (7)$$

图 2 为声光器件外接信号源的电路示意图。假设接入的电信号功率为 P_e , 设输入阻抗为 Z_{in} , 串联阻抗为 Z_{se} , 电源阻抗大小为 Z_{so} 。由电磁学理论可得, 平均吸收声功率可表示为

$$P_a = 1/2 \text{Re}(\tilde{V}\tilde{I}) = 1/2 I^2 \text{Re}(Z_{in}) \tilde{V}_{so}, \quad (8)$$

式中 \tilde{V} 、 \tilde{I} 分别为输入阻抗两端的交流电压和交流电流, \tilde{V}_{so} 为源交流电压。根据欧姆定律, 电流可表示为

$$I = |\tilde{I}| = \frac{V_{so}}{\sqrt{[\text{Re}(Z_{so}) + \text{Re}(Z_{se}) + \text{Re}(Z_{in})]^2 + [\text{Im}(Z_{so}) + \text{Im}(Z_{se}) + \text{Im}(Z_{in})]^2}}, \quad (9)$$

式中 $\text{Re}(\cdot)$ 、 $\text{Im}(\cdot)$ 分别表示取实部和取虚部运算。

将(9)式代入(8)式, 可得

$$P_a = \frac{V_{so}^2}{2} \frac{\text{Re}(Z_{in})}{\sqrt{[\text{Re}(Z_{so}) + \text{Re}(Z_{se}) + \text{Re}(Z_{in})]^2 + [\text{Im}(Z_{se}) + \text{Im}(Z_{in})]^2}}. \quad (10)$$

将(5)、(7)、(10)式联立, 可得

$$\Delta\phi = \frac{\pi p n^3}{\lambda} \sqrt{\frac{2P_e l}{Z \nu_a^2 d}} \frac{4\text{Re}(Z_{so}) \text{Re}(Z_{in})}{[\text{Re}(Z_{so}) + \text{Re}(Z_{se}) + \text{Re}(Z_{in})]^2 + [\text{Im}(Z_{se}) + \text{Im}(Z_{in})]^2}, \quad (11)$$

式中 d 为光纤直径, Z_{in} 由光纤镀膜器件的 8 个参数决定。根据图 1 所示的二端口网络等效模型, 求得^[17]

$$Z_{in} = A_p Z_p \frac{k_i^2 \nu_p}{\omega^2 c_0 d_p} \frac{Z_{22} + Z_o - Z_{21} - Z_{11} - Z_i + Z_{12}}{(Z_{11} + Z_i)(Z_{22} + Z_o) - Z_{12} Z_{21}} - \frac{j}{\omega c_0}, \quad (12)$$

式中 A_p 为压电层面积, Z_p 为波阻抗, k_i 为耦合系数, ω 为角频率, c_0 为压电层电容, d_p 为压电层厚度, Z_{ij} ($i, j = 1, 2$) 为二端口网络模型参数, ν_p 为压电层声波速度。相位偏移量 $\Delta\phi$ 越大, 表示声光器件的调制程度越高, 通过优化可以使 $\Delta\phi$ 达到最大值。

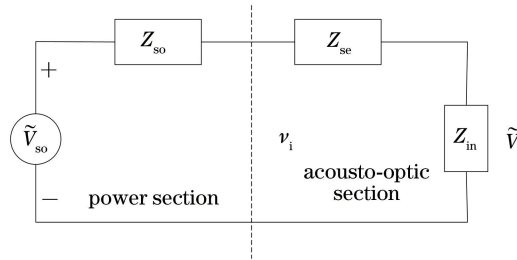


图 2 声光器件外接信号源的电路示意图

Fig. 2 Circuit diagram of external signal source for acousto-optic device

3 基于 HPSO 的相位偏移参数优化

HPSO 是一种人工智能算法, 它的主要特点是将遗传算法(GA)中的交叉算子引入基本粒子群算法中。基于 HPSO 的相位偏移参数优化的主要流程如下。

1) 器件参数初始化。首先对该算法中涉及的 4 个变量进行初始化, 包括粒子位移、迭代次数、速度和权重。迭代次数设置为 50。位移和速度的初始化主要是指对器件的 8 个参数进行更新, 包括顶电极、压电层厚度、底电极厚度、光纤半径、谐振腔长度、工作频率、接入的串联阻抗和电压源阻抗。更新公式为

$$\nu_{ij}^{k+1} = k [\omega \nu_{ij}^k + c_1 r_1 (p_{ij}^k - x_{ij}^k) + c_2 r_2 (g_{ij}^k - x_{ij}^k)], \quad (13)$$

$$x_m(t+1) = s x_m(t) - (1-s) x_n(t), \quad (14)$$

$$x_n(t+1) = s x_n(t) + (1-s) x_m(t), \quad (15)$$

式中 i 代表第 i 个粒子, j 代表速度(或位置)的第 j 维, t, k 代表迭代次数, ν 和 x 分别为粒子的速度和位置, c_1, c_2 为学习因子, r_1, r_2 为介于 $[0, 1]$ 之间的随机数, k 为收缩因子, ω 为速度权重, p 为粒子个体极值坐标, g 为群体全局极值坐标, m, n 分别代表第 m, n 个粒子, s 为交叉概率。

2) 记录每次迭代的位移和速度的合适值。

3) 将每次迭代局部的合适值与其最好位置对应的值进行比较, 在符合器件约束条件的前提下, 记录当

前局部最好值。

- 4) 将每个局部最好值与全局所有最好值进行比较,在符合器件约束条件的前提下,记录全局最好值。
- 5) 根据(13)~(15)式更新位移和速度,在约束条件下对其范围进行判断和限制。
- 6) 结束迭代。如不满足终止条件,转步骤 2)。

4 仿真结果研究

4.1 HPSO 对器件优化后的参数结果分析

通过遗传算法、标准粒子群算法和混合粒子群优化算法对器件的相位偏移量进行优化,每种算法进行 5 次运算,并取 5 次结果的平均值,结果如表 1 所示。从表 1 可以看出,HPSO 的优化效果较好,相位偏移量大概可以达到 0.07 rad。表 2 为利用 HPSO 优化后的 8 个器件参数值,包括工作频率 f 、压电层厚度 d_p 、顶电极厚度 d_t 、底电极厚度 d_b 、光纤半径 R 、谐振腔长度 L 、串联阻抗 Z_{se} 和器件源阻抗 Z_{so} 。

表 1 相移优化统计结果

Table 1 Statistical results of phase shift optimization

Algorithm	Phase shift / rad					Mean
	Test 1	Test 2	Test 3	Test 4	Test 5	
GA	0.029128	0.029128	0.029128	0.029128	0.029128	0.029128
PSO	0.060493	0.049910	0.056077	0.057212	0.062278	0.057194
HPSO	0.069482	0.075461	0.064030	0.071110	0.071694	0.070355

表 2 器件参数优化值

Table 2 Optimal values of device parameters

Test number	L / m	$d_p / (10^{-6} \text{ m})$	$R / (10^{-5} \text{ m})$	$d_b / (10^{-7} \text{ m})$	$d_t / (10^{-6} \text{ m})$	$f / (10^9 \text{ Hz})$	Z_{se}	Z_{so}
1	0.0054	4.3019	4.8029	2.1707	1.5000	1.9331	15.5468+29.5112i	73.2783+26.5335i
2	0.0055	2.9445	2.0449	3.9190	1.3068	1.4868	39.9183+0.3101i	72.8200+20.7514i
3	0.0048	3.6858	8.1489	3.4032	1.2430	1.1106	26.9747+27.1022i	31.2484+29.4112i
4	0.0022	3.5179	5.7306	2.3558	1.0912	1.6167	40	55.9662+29.2160i
5	0.0056	4.5549	9.7146	4.0000	0.5733	0.1895	8.8400+7.2871i	34.6467+37.2798i

4.2 器件 8 个参数对相位偏移量的影响

选取表 2 中测试 1 的数据,分别研究 8 个参数对 $\Delta\phi$ 的影响。

1) 顶电极厚度 d_t 对 $\Delta\phi$ 的影响。如图 3 所示,当顶电极厚度范围为 $(0.75 \sim 1.20) \times 10^{-6} \text{ m}$ 时, $\Delta\phi$ 变化比较明显。当顶电极厚度为 $1.5 \times 10^{-6} \text{ m}$ 左右, $\Delta\phi$ 具有极大值,但并不是最优值。因此,在制作条件允许的情况下,可以将顶电极厚度设置为 $(0.75 \sim 1.20) \times 10^{-6} \text{ m}$ 。由图 3 可知,顶电极厚度具有规律性的变化且对 $\Delta\phi$ 的影响较大,利用该特性可以适当调节顶电极厚度以满足其他参数要求。

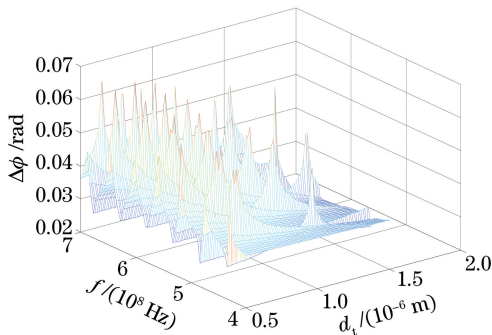


图 3 顶电极厚度 d_t 对相位偏移量 $\Delta\phi$ 的影响
Fig. 3 Effect of top electrode thickness d_t on phase shift $\Delta\phi$

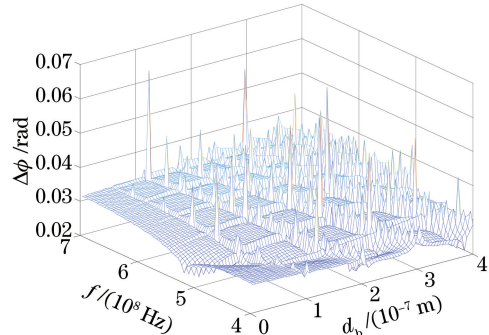


图 4 底电极厚度 d_b 对相位偏移量 $\Delta\phi$ 的影响
Fig. 4 Effect of bottom electrode thickness d_b on phase shift $\Delta\phi$

2) 底电极厚度 d_b 对 $\Delta\phi$ 的影响。由图 4 可知,底电极厚度对相位偏移的影响很大,数据稍有偏差便容易导致相位偏移量远离最优值。工作频率约为 5.3×10^8 Hz 时,相位偏移量很小,此时相位偏移量易出现反向极值,因此工作频率应避免在 5.3×10^8 Hz 附近。由于底电极处于压电层与光纤之间,必须考虑电能与声能的耦合程度,因此底电极应尽可能薄。

3) 压电层厚度 d_p 对 $\Delta\phi$ 的影响。从图 5 可以看出,压电层厚度对相位偏移的影响没有特定规律,但是压电层厚度对相位偏移的影响比底电极厚度的影响大。图 5 中跳变点非常多,相位偏移最优值区间较窄,因此压电层厚度的确定是器件制作的核心问题。仿真结果符合压电层的物理特性,因为压电层可以完成声光能量之间的转换,是决定器件技术指标的主要因素。由图 5 可以看出,相位偏移量在某些较窄的区域能够取得比较理想的值,但对压电层厚度的精度要求比较高。

4) 光纤半径 R 对 $\Delta\phi$ 的影响。光纤半径产生的径向张力引起相位变化。分析图 6 可以看出,光纤半径对相位偏移的影响没有明显的规律,相位偏移量取得较理想的值所在的区域也比较窄,主要原因是压电层厚度的变化导致了光纤径向张力的产生。因此光纤半径和压电层厚度对相位偏移量的影响比较类似,器件对光纤半径的精度要求同样很高。

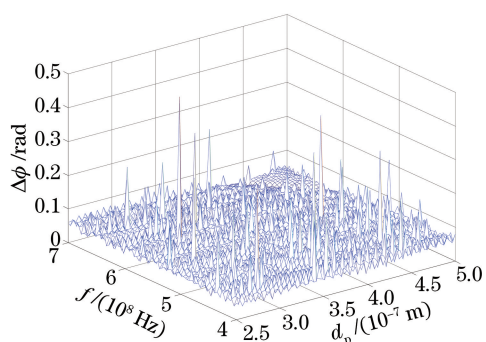


图 5 压电层厚度 d_p 对相位偏移量 $\Delta\phi$ 的影响
Fig. 5 Effect of thickness of piezoelectric layer d_p on phase shift $\Delta\phi$

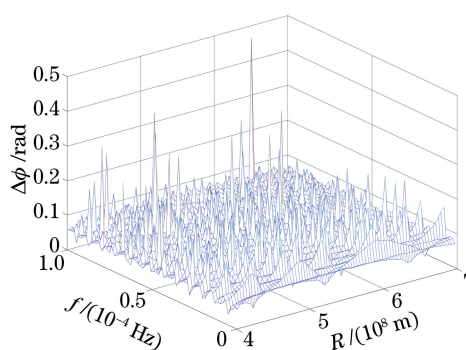


图 6 光纤半径 R 对相位偏移量 $\Delta\phi$ 的影响
Fig. 6 Effect of fiber radius R on phase shift $\Delta\phi$

5) 谐振腔长度 L 对 $\Delta\phi$ 的影响。谐振腔长度对相位偏移量的影响较大,如图 7 所示。相位偏移量的收敛区间比较宽,容易控制。收敛区间内可能出现反向极值,设计和制作器件时应该避免选择出现反向极值时对应的谐振腔长度和工作频率。另外,谐振腔长度与器件的工作频率之间的联系也较紧密,增大谐振腔长度,器件工作频率便会减小。利用上述这些特性,适当改变谐振腔长度可以实现相位偏移最优值的获取。

6) 串联阻抗 Z_{se} 对 $\Delta\phi$ 的影响。由图 8 可以看出,在相位偏移取极值时的频率范围内,设备的串联等效阻抗与相位偏移量大小成反比。由电磁学理论可知,电路阻抗越小,能量损耗越小,器件获得的功率越大,相位偏移量越大,因此应适当减小电路中的串联阻抗以提高相位偏移量。但是,串联阻抗不能无限制减小,因为当串联阻抗的容抗变化时,器件的工作频率也会发生变化,更重要的原因是输出阻抗(串联等效阻抗和器件等效阻抗之和)与前一级输入阻抗匹配后才能使负载获得最大的输出功率。

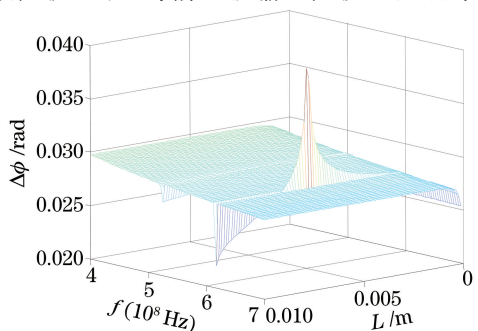


图 7 谐振腔长度 L 对相位偏移量 $\Delta\phi$ 的影响
Fig. 7 Effect of resonant cavity length L on phase shift $\Delta\phi$

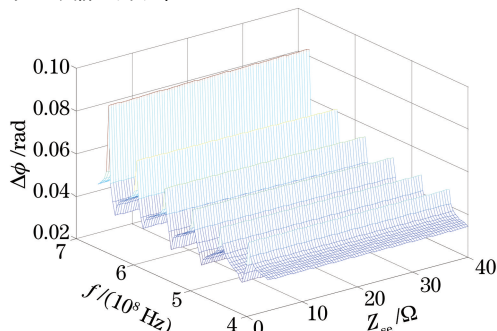


图 8 串联阻抗 Z_{se} 对相位偏移量 $\Delta\phi$ 的影响
Fig. 8 Effect of series impedance Z_{se} on phase shift $\Delta\phi$

7) 源阻抗 Z_{so} 对 $\Delta\phi$ 的影响。比较图 8、9 可以看出,源阻抗与串联阻抗对相位偏移的影响基本相同。在电路中,源阻抗和串联阻抗都是电路阻抗的一部分,二者的特性也是相同的。仿真结果符合设备的物理特性。源阻抗可以看作设备的输入阻抗,当源阻抗与输出阻抗匹配时,可以保证负载器件获得最大功率。在源阻抗与输出阻抗匹配的条件下,适当减小源阻抗的值,可以减小输入损耗,从而保证输出功率尽可能达到最大。

8) 频率 f 对 $\Delta\phi$ 的影响。在讨论上述其他 7 个影响因素的同时,也考虑了频率对 $\Delta\phi$ 的影响,这里不再赘述。

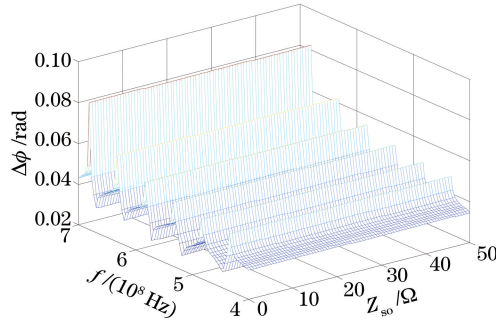


图 9 源阻抗 Z_{so} 对相位偏移量 $\Delta\phi$ 的影响

Fig. 9 Effect of source impedance Z_{so} on phase shift $\Delta\phi$

4.3 相频特性实验结果与仿真结果分析

图 10 为测量相位偏移的实验装置原理图。将氦氖激光器作为器件光源,法拉第旋转器(FR)的作用是绝缘和进行偏振控制(PC)。光信号可以对声光设备产生作用,循环器和 $50\ \Omega$ 负载的主要作用是防止反馈信号的干扰。传感器输出的光线集中在标准具(FP)上,然后进入光电探测器(PD)。控制器可以控制标准具来完成调谐,并为示波镜(CRO)提供参考信号。利用示波镜可以观察基波和二次谐波的光频谱。利用已调信号光谱中的基波和一次谐波,可以获得信号的幅值,并根据关系式 $a_1/a_2 = J_1(\Delta\phi)/J_2(\Delta\phi)$ 得到相移 $\Delta\phi$ ^[19],其中 a_1 为基波幅值, a_2 为二次谐波的幅值, $J_n(\cdot)$ 为贝塞尔函数的 n 次展开式。

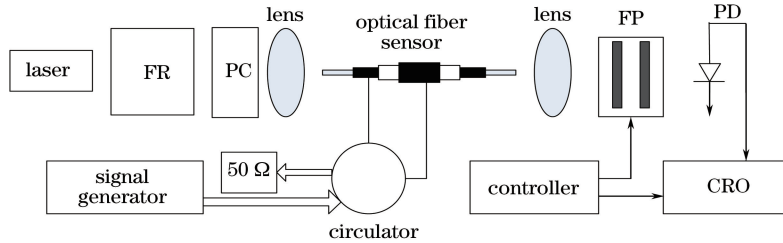


图 10 测量相位偏移的实验装置原理图

Fig. 10 Diagram of experimental setup of phase shift measurement

在 $400\sim 700$ MHz 频率范围内得到的实验结果如表 3 所示^[20]。选取表 2 中测试 1 的相关数据,研究镀膜光纤设备的相频特性,结果如图 11 所示。图 11 中虚线为根据表 3 中的实验数据绘制而成的相频特性曲线,实线为优化后的理论相频曲线。比较两组曲线,可以得到优化后的相位偏移最大值可以达到 0.075 rad,现有的实验条件可以获得的相位偏移最大值为 0.046 rad。理论值与实验值的相频特性规律基本一致,证明了该优化模型的正确性。

表 3 在 $400\sim 700$ MHz 频率范围内得到的相位偏移实验结果

Table 2 Experimental results of phase shift when frequency is from 400 MHz to 700 MHz

Frequency /MHz	a_1 /mV	a_2 /mV	$\Delta\phi$ /mrad	Frequency /MHz	a_1 /mV	a_2 /mV	$\Delta\phi$ /mrad
400	715	15.2	42.47	535	630	20.0	63.12
415	780	15.0	38.63	550	625	13.0	41.75
430	710	14.5	40.87	565	660	16.5	49.85
445	670	13.5	40.29	580	700	14.5	41.59
460	690	11.5	33.33	595	750	13.0	34.67
475	670	11.0	32.10	610	730	22.5	61.93
490	640	15.0	46.94	625	660	12.5	37.85
505	770	12.5	32.47	640	675	15.0	44.38
520	720	15.0	41.66	655	740	21.0	56.23

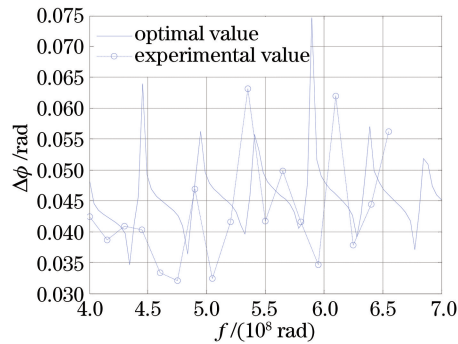
图 11 相位偏移 $\Delta\phi$ 随频率的变化

Fig. 11 Variation in phase shift with frequency

5 结 论

提出了 ZnO 镀膜光纤传感器相位偏移的优化模型,分析了器件的 8 个参数(顶电极厚度、底电极厚度、压电层厚度、光纤半径、谐振腔长度、串联阻抗、源阻抗、工作频率)对相位偏移量的影响。器件对压电层厚度和光纤半径的精度要求较高,选择源阻抗和串联阻抗的关键在于二者是否匹配。谐振腔长度对相位偏移的影响比较容易控制。优化后最大相位偏移量的理论值可以达到 0.075 rad 左右。研究表明,相位偏移的实验值与理论值具有一致性,进一步表明了该优化模型的正确性。后期还需综合考虑器件的反射系数与相位偏移的多目标模型优化设计方案,并进行器件材料的研究,以便满足优化数据的要求,并进行实验验证。

参 考 文 献

- [1] Roeksabutr A, Chu P L. ZnO-coated fiber acoustooptic phase modulator[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1997, 9(5): 613-615.
- [2] Zhao Yong, Rong Min, Liao Yanbiao. Reflex optical fiber sensor and compensation technique for temperature measurement under offshore oil well[J]. Chinese J Lasers, 2003, 30(1): 75-78.
赵 勇, 荣 民, 廖延彪. 用于海洋井下温度检测的反射式光纤传感器及补偿技术[J]. 中国激光, 2003, 30(1): 75-78.
- [3] King D, Lyons W B, Flanagan C, *et al.* An optical-fiber sensor for use in water systems utilizing digital signal processing techniques and artificial neural network pattern recognition[J]. IEEE Sensors Journal, 2004, 4(1): 21-27.
- [4] Chu C S, Lo Y L. A plastic optical fiber sensor for the dual sensing of temperature and oxygen[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2008, 20(1): 63-65.
- [5] Xiao G, Mrad N, Wu F, *et al.* Miniaturized optical fiber sensor interrogation system employing echelle diffractive gratings demultiplexer for potential aerospace applications[J]. IEEE Sensors Journal, 2008, 8(7): 1202-1207.
- [6] Liu Jinxuan, Chai Jing, Zhu Lei, *et al.* Theory of fiber Bragg grating multi-point sensing of rock deformation and its engineering application[J]. Acta Optica Sinica, 2008, 28(11): 2143-2147.
刘金瑄, 柴 敬, 朱 磊, 等. 岩层变形检测的光纤光栅多点传感理论与工程应用[J]. 光学学报, 2008, 28(11): 2143-2147.
- [7] Lee K M, Foong S. Lateral optical sensor with slip detection for locating live products on moving conveyor[J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2010, 7(1): 123-132.
- [8] Gu Bobo. Some optical sensors based on novel structured fibers and their applications[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012: 16-18.
顾波波. 新型结构光纤传感器及其应用研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2012: 16-18.
- [9] Uz Kent B, Hoffman M J, Vodacek A, *et al.* Feature matching with an adaptive optical sensor in a ground target tracking system[J]. IEEE Sensors Journal, 2015, 15(1): 510-519.
- [10] Zhou Li, Gu Ping, Li Xiaogang, *et al.* Reflection coefficient of optical fiber acousto-optic phase modulator coated with piezoelectric ZnO[J]. Acta Optica Sinica, 2002, 22(2): 206-209.
周 力, 顾 平, 李晓刚, 等. 镀膜光纤声光相位调制器及压电层反射系数的研究[J]. 光学学报, 2002, 22(2): 206-209.

- [11] Zhou Li, Gu Ping, Cheng Yifan. Network model of optical fiber sensor coated with piezoelectric ZnO[J]. Journal of Xiamen University (Natural Science), 2001, 40(1s): 178-181.
周力, 顾平, 程宜凡. 镀膜光纤声光传感器的网络模型[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2001, 40(1s): 178-181.
- [12] Snyder D M. Optical phase-shift dynamics in surface-modified transparent polymers: Application of wavefront distortion analysis to refractive index (RI)-based sensor development[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2014, 195: 473-477.
- [13] Kim S H, Lee J J. Phase-shifted transmission/reflection-type hybrid extrinsic Fabry-Perot interferometric optical fiber sensors[J]. Journal of Lightwave Technology, 2003, 3(21): 797-804.
- [14] Zhou Ya, Zhou Li. Research on piezoelectric film electrodeposition for optical fiber sensor with ZnO coating[J]. Piezoelectrics & Acousto-optics, 2005, 27(3): 225-228.
周雅, 周力. 镀膜光纤传感器氧化锌压电层薄膜沉积的研究[J]. 压电与声光, 2005, 27(3): 225-228.
- [15] Zhao Lei, Chen Weimin, Zhang Peng. Optimization on end reflectivity of fiber optic F-P sensor[J]. Acta Photonica Sinica, 2007, 36(6): 1008-1012.
赵雷, 陈伟民, 章鹏. 光纤法布里-珀罗传感器光纤端面反射率优化[J]. 光子学报, 2007, 36(6): 1008-1012.
- [16] Liu Qi, Zhou Li, Zhou Ya. Parameter optimization of power coupling efficiency of optical fiber sensor with ZnO coating[J]. Piezoelectrics & Acousto-optics, 2012, 34(4): 523-526.
刘奇, 周力, 周雅. ZnO 镀膜光纤传感器功率耦合效率参数优化[J]. 压电与声光, 2012, 34(4): 523-526.
- [17] Goicoechea J, Hernandez M, Zamarreno C R, *et al.* Coatings for optical fiber sensors[J]. Comprehensive Materials Processing, 2014, 13(4): 103-119.
- [18] Duan Xiaodong, Wang Cunrui, Liu Xiangdong. Particle swarm optimization and application[M]. Beijing: Science Press, 2007: 145-151.
段晓东, 王存睿, 刘向东. 粒子群算法及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2007: 145-151.
- [19] Jauregui-Vazquez D, Haus J W, Negari A B H, *et al.* Bitapered fiber sensor: Signal analysis[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2015, 218: 105-110.
- [20] Liu Qi. The parameter optimization of optical fiber sensor with ZnO coating based on hybrid particle swarm optimization[D]. Nanchang: Nanchang Hangkong University, 2010: 49.
刘奇. 基于混合粒子群优化算法的 ZnO 镀膜光纤传感器的参数优化[D]. 南昌: 南昌航空大学, 2010: 49.