

折射率温度敏感式医用光纤 温度传感器的研究

潘应天 刘贤德

(华中理工大学光学系, 湖北, 武汉, 430074)

摘要——基于温敏探头包层折射率随温度变化引起其传输损耗变化的基本原理, 本文提出一种温敏光传输模型, 运用该传输模型分析温敏探头有关参数对传感器灵敏度的影响, 并设计了传感器。实验表明, 在 $35\sim 45^{\circ}\text{C}$ 范围内, 传感器温度分辨率 $\Delta T \leq 0.1^{\circ}\text{C}$, 最佳分辨率可达 0.04°C 。

关键词——折射率, 光纤温度传感器。

1. 引 言

光纤传感器具有体积小、柔性好、抗电磁干扰能力强等优点, 在传感器领域里独树一帜, 特别是在强电磁场或其他有害环境中。如现代生物医学工程中新发展起来的癌症热疗技术, 必须在微波或高频电磁加热场中高精度、快速监控受热区温度^[1], 现有医用温度计对此几乎无能为力; 但是可以较容易地将光纤温度传感器温敏探头注入体内实现小区域“点”温测量, 与此同时又不影响加热电磁场的分布, 避免了局部热斑的引入^[2]。本文提出的折射率温敏式医用光纤温度传感器具有结构简单、成本低、加工方便等优点, 便于实用开发。

2. 光传输模型分析

有关折射率温敏式光纤温度传感器的温敏探头光传输损耗处理, 已有文献报道^[3, 4]。其基本思想是将一小段多模光纤的包层剥去, 换以折射率温度灵敏材料。设该温敏材料具有折射率负温度系数(大多数液体材料具有这一特性), 则当其折射率在 n_1 、 n_2 (其中 n_1 、 n_2 分别为原光纤的纤芯和包层的折射率) 之间随温度 T 下降时, $n_2(T)$ 上升, $n_2(T)$ 为温敏包层折射率(见图 1)。

以光纤中传输的子午线为例, 温敏区全反射临界角 $\theta_c(T)$ 为

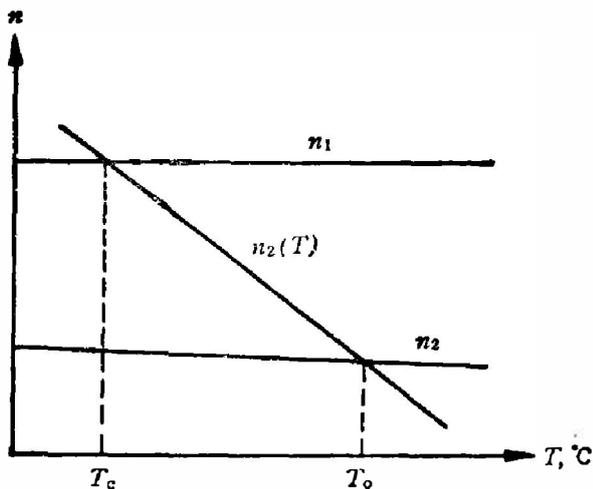


图 1 纤芯、包层及温敏包层折射率随温度变化示意图

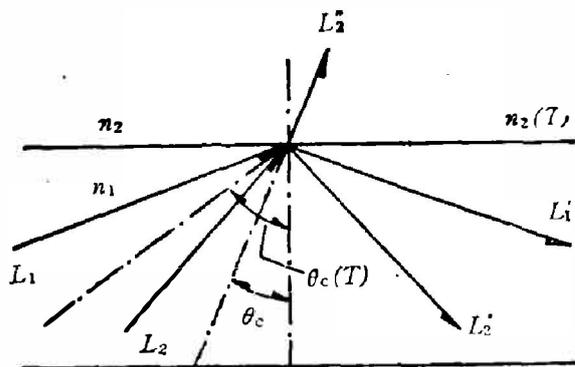


图 2 温敏区临界角变化引起部分导波溢出损耗示意图

Fig. 1 A sketch of refractive indices as functions of temperature for core, normal cladding and modified cladding respectively. Fig. 2 Schematic diagram showing transmission loss effects induced by the critical angle (θ_c) of the temperature probe.

$$\theta_c(T) = \sin^{-1} \frac{n_2(T)}{n_1} > \theta_o = \sin^{-1} \frac{n_2}{n_1} \quad (1)$$

式(1)中, $\theta_c(T)$ 及 θ_o 分别为温敏区及原光纤的全反射临界角, 如图 2 所示。于是, 原光纤中在 $\theta_o \sim \theta_c(T)$ 内传输的导波在温敏区中不能满足全反射条件, 其中有部分因转变为泄漏波而被损耗, 因此, 引起光纤中传输光强的减弱。

在整个温度变化范围内, 当 $T > T_o$, $n_2(T) < n_2$ 时, 光纤中无损耗; 当 $T_o \leq T \leq T_c$, $n_2(T) > n_2$, $\theta_c(T) > \theta_o$ 时, 光纤中 $\theta_c(T) \sim \theta_o$ 内的导波溢出; 其中, 当 $T = T_c$, $n_1 = n_2(T)$, $\theta_c(T) = 90^\circ$ 时, 纤芯和包层两介质间光学界面消失, 除掠射外, 几乎所有的光束溢出; 当 $T < T_o$, $n_1 < n_2(T)$ 时, 无全反射区, 但光学界面重新出现, 反射光束随之出现。

综上所述, 经这一小段温敏区后, 光纤中传输光强有规律地随温度变化, 如图 3 所示。由此可见, 在温度 $T_o < T < T_c$ 之间, 输出光强 $P(T)$ 随温度 T 单调上升, 检测输出光强 $P(T)$ 即可间接测量温度 T 。

医用光纤温度传感器测温精度要求很高, 在 $35 \sim 45^\circ\text{C}$ 之间, 须保证分辨率 $\Delta T \leq \pm 0.1^\circ\text{C}$, 并有较快的响应速度, 这两个参数与图 4 中探头长度 L 、内径 b 、温敏包层折射率 $n_2(T)$ 及 $dn_2(T)/dT$ 等因素有关。下面我们从波导模式理论出发, 建立传感器光传输方程, 分析其温度变化率与探头各参数的关系, 导出传感器设计的物理模型。

根据介质波导模式理论, 受激多模光纤可产生导模与辐射模两类模式。因此, 光纤中总光场可表示为两类模式场之和,

$$\begin{cases} \mathbf{E}(\mathbf{r}) = \sum_j a_j \mathbf{E}_j(\mathbf{r}) + \mathbf{E}_{rad}(\mathbf{r}); \\ \mathbf{H}(\mathbf{r}) = \sum_j a_j \mathbf{H}_j(\mathbf{r}) + \mathbf{H}_{rad}(\mathbf{r}). \end{cases} \quad (2)$$

从模式分析的角度来看, 传感器的工作原理为: 温度降低, 探头温敏区内光纤结构参数

$$V(T) = \frac{2\pi\rho}{\lambda} (n_1^2 - n_2^2(T))^{\frac{1}{2}}$$

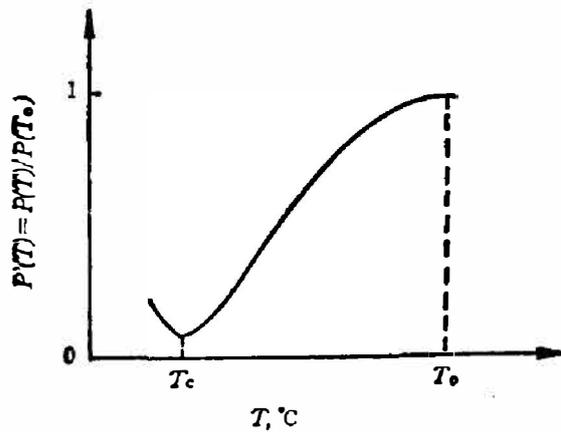


图3 归一化光强随温度变化曲线

Fig. 3 Normalized light intensity as a function of temperature.

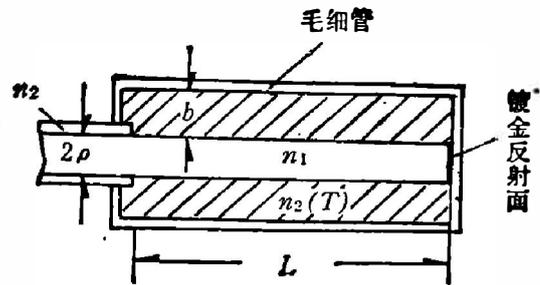


图4 温敏探头结构示意图

Fig. 4 Sketch of the fiber optic temperature probe.

随之下降,引起光纤中部分高阶导模截止,转化为辐射模溢出损耗。

辐射模传输常数 β 为连续谱,故而不如正规模那样具有较为成熟的分析方法。为此,我们借助泄漏模理论分析多模光纤高阶模损耗,即:外延第 q 阶泄漏模为截止频率 V_c 下的 q 阶导模,相应地, β 为模式本征方程复解,

$$\beta = \beta^r + j\beta^i;$$

其中, β^i 表示模式损耗。由于泄漏模 $\beta^i \ll \beta^r$, 故 β^i 可近似为模式本征方程的一级微扰^[5]。

根据这一思想有

$$\begin{cases} \mathbf{E}_{rad}(\mathbf{r}) = \sum_j a_j \mathbf{E}_j(\mathbf{r}) + \mathbf{E}_{sw}; \\ \mathbf{H}_{rad}(\mathbf{r}) = \sum_j a_j \mathbf{H}_j(\mathbf{r}) + \mathbf{H}_{sw}. \end{cases} \quad (3)$$

式(3)物理意义为:辐射场由靠近或纤芯中的泄漏模与无限远包层介质中远场 $\mathbf{E}_{sw}(\mathbf{H}_{sw})$ ——自由波场(相当于泄漏至光纤外)构成。相应的模式系数可定义为

$$\begin{cases} \beta = \beta^r + j\beta^i; \\ u = u^r + ju^i; \\ W = W^r + jW^i \quad \text{或} \quad Q = iW. \end{cases} \quad (4)$$

电磁场空间分布为

$$\begin{cases} \mathbf{E}_j(\mathbf{r}) = \mathbf{e}_j(x, y) e^{i\beta^r z} e^{-\beta^i z}; \\ \mathbf{H}_j(\mathbf{r}) = \mathbf{h}_j(x, y) e^{i\beta^r z} e^{-\beta^i z}. \end{cases} \quad (5)$$

根据电磁场理论,各模式携带功率为

$$P_j \propto |\mathbf{E}_j \times \mathbf{H}_j| \propto e^{-2\beta^i z} \quad (6)$$

显而易见,因子 $2\beta^i$ 即为模式功率衰减系数 ν_j

$$\nu_j = -\frac{1}{P_j} \frac{dP_j}{dz} = 2\beta^i. \quad (7)$$

将式(4)中各模式参数代入本征模的模式方程及模式本征方程,并假定为弱导光纤以便推导,整理后有^[6,7]

$$\begin{cases} \nu_i = 2\beta_i^2 = \frac{4}{\pi} (2\Delta)^{\frac{1}{2}} \frac{u^2}{V^3 \rho} \frac{1}{|H_{i-1}^{(1)}(Q) H_{i+1}^{(1)}(Q)|}; \\ P_{gi}(Z) = \frac{\pi}{2} |a_i|^2 \rho^2 n_1 \left(\frac{\epsilon_0}{\mu_0} \right) \frac{V^2}{u^2} \cdot \frac{|H_{i-1}^{(1)}(\theta) H_{i+1}^{(1)}(\theta)|}{|H_i^{(1)}(\theta)|^2} e^{-\nu_i Z}. \end{cases} \quad (8)$$

式(8)中 ρ, V 分别为纤芯半径及正化频率, $H^{(1)}(Q)$ 为一阶 Hankel 函数, 它是将 $Q = iW$ 代入本征模式方程, 由 $K(W)$ 函数变换所得.

对各模式功率取和, 并将 ν_i 式代入即有:

$$\begin{aligned} P_{gt}(Z, T) &= \sum_{i=1}^{\frac{V^2}{2}} P_{gi}^{(i)}(Z) = \sum_{i=1}^{\frac{V^2}{2}} P_{gi}^{(i)}(0) e^{-\nu_i Z} \\ &= \sum_i \frac{\pi}{2} |a_i|^2 \rho^2 n_1^2 \left(\frac{\epsilon_0}{\mu_0} \right)^{\frac{1}{2}} \frac{V^2(T)}{u_i^2} \frac{|H_{i-1}^{(1)}(Q) H_{i+1}^{(1)}(Q)|}{|H_i^{(1)}(Q)|^2} \\ &\quad \cdot \exp \left[-\frac{\pi}{4} \frac{(2\Delta)^{1/2}}{\rho V^3} \cdot u^2 \cdot \frac{Z}{|H_{i-1}^{(1)}(Q) \cdot H_{i+1}^{(1)}(Q)|} \right] \end{aligned}$$

式(9)中, $P_{gt}(Z, T)$ 是光在温度为 T 的传感器探头在温敏区内传输距离 Z 后, 光纤中的总光强, 其温度特性由参数 $V(T) = \frac{2\pi\rho}{\lambda} [n_1^2 - n_2^2(T)]^{\frac{1}{2}}$ 定义, 而 $n_2(T)$ 可表述为

$$n_2(T) = n_1 - \left| \frac{dn_2(T)}{dT} \right| (T - T_0).$$

式(9)是借助泄漏模思想, 基于光纤模式理论推导出来的, 因而可普遍适用. 实际上, 对于大芯径多模光纤, 如 $V=100$, 相邻模式间离散化:

$$\delta\beta = \frac{\beta_{i+1} - \beta_i}{\beta_i} \ll 10^{-4}.$$

模式趋于连续化, 故将式(9)中各模式参数 u, Q 以相应的射线参数 $\bar{\beta}, \bar{l}$

$$\begin{cases} \bar{\beta} = n_1 \cos \theta_s; \\ \bar{l} = n_1 \cos \theta_s \sin \theta_s; \end{cases} \quad (10)$$

代入, 其中 Q_s, Q_s 为入射光线分别与光纤轴及入射点截面切线间的夹角. 注意到: 高阶模

$$l \geq 1, \quad |H_{i+1}^{(1)}(Q) H_{i-1}^{(1)}(Q)| \simeq |H_i^{(1)}(Q)|^2;$$

当 $Q \geq l$, 或 $\sin Q_s \sin Q_s \geq \sin Q_0$ 时,

$$|H_i^{(1)}(Q)|^2 \simeq \frac{2}{\pi(Q^2 - l^2)};$$

当 $\theta < l$, 或 $\sin Q_s \sin Q_s < \sin Q_0$ 时,

$$|H_i^{(1)}(Q)|^2 \simeq \frac{2}{\pi(l^2 - Q^2)} e^{-[2(l^2 - Q^2)]^{1/2} - 2l \cosh^{-1} \frac{l}{Q}}.$$

并将模式功率系数 $|a_i|^2$ 以射线功率分布函数 $\psi(\bar{\beta}, \bar{l})$ ($\psi(\bar{\beta}, \bar{l}) = d\psi(\bar{\beta}, \bar{l})/d\bar{\beta}d\bar{l}$) 取代, 整理后即有:

$$\begin{cases}
 P_g(L_0, T) = \int_{n_2(T)}^{n_1} \int_0^{\sqrt{n_1^2 - \bar{\beta}^2}} \psi(\bar{\beta}, \bar{l}) d\bar{\beta} d\bar{l} + \int_{n_2(T)}^{n_1} \int_0^{\sqrt{n_1^2(T) - \bar{\beta}^2}} \psi(\bar{\beta}, \bar{l}) \\
 \quad \cdot e^{-2L_0 \nu_{rr}} d\bar{\beta} d\bar{l} + \int_{n_2}^{n_1} \int_{\sqrt{n_1^2(T) - \bar{\beta}^2}}^{\sqrt{n_1^2 - \bar{\beta}^2}} \psi(\bar{\beta}, \bar{l}) e^{-2L_0 \nu_{rr}} d\bar{\beta} d\bar{l}; \\
 \psi(\bar{\beta}, \bar{l}) = \frac{8\pi\rho^2 I_0}{n_0^2} \frac{\bar{\beta}(n_1^2 - \bar{\beta}^2 - \bar{l}^2)^{\frac{1}{2}}}{n_1^2 - \bar{\beta}^2}; \\
 \nu_{rr} = \frac{2(n_1^2 - \bar{\beta}^2)(n_2^2(T) - \bar{l}^2 - \bar{\beta}^2)^{\frac{1}{2}}}{\rho\bar{\beta}[(n_1^2 - \bar{l}^2 - \bar{\beta}^2)^{\frac{1}{2}} + (n_2^2(T) - \bar{l}^2 - \bar{\beta}^2)^{\frac{1}{2}}]^2}; \\
 \nu_{tz} = \frac{2(n_1^2 - \bar{\beta}^2)(\bar{\beta}^2 + \bar{l}^2 - n_2^2(T))^{\frac{1}{2}}}{\rho(n_1^2 - n_2^2(T))n_1} e^{-\frac{2}{3}K\rho\frac{(l^2 + \bar{\beta}^2 - n_1^2(T))^{\frac{1}{2}}}{\bar{\beta}^2 - n_2^2(T)}}
 \end{cases} \quad (11)$$

式(11)即为折射率温敏式医用光纤温度传感器光传输模型。该模型基于波导模式理论并经模式连续化处理所得,包括了非子午线的传输损耗,大大优于以往的射线光学模型,具有一定的准确性。

3. 传感器设计和实验分析

以式(11)为模型编程,并将图4中的 l 、 $n_2(T)$ 、 $\frac{dn_2(T)}{dT}$ 等以参变量输入运算,即可算出它们对传感器温度分辨率的影响程度,导出最佳参数。与此同时,我们还进行了实验研究,测试装置如图5所示,图中样品测试器为一带搅拌装置的封闭容器,将光纤中长度为 L_0 的裸纤芯部分浸在容器液体中,其折射率 $n_2(T)$ 在阿贝折射计监测下调配。



图5 传输系数与温敏探头各参数关系测试装置

Fig. 5 Experimental set-up for measuring the transmitted intensity versus parameters of the probe.

图6曲线是按模型式(11)计算得到的理论曲线, η 是归一化功率传输系数。图7则是按图5测试装置实测的曲线,其中,虚线部分对应的是 $n_2(T) > n_1 = 1.4580$ 的情况。

两图均以温敏区探头长度 L_0 为参数分析其对传感器灵敏度的影响,比较两图中各 L 值所对应的曲线,可见其吻合得较好。随 L_0 增大,传感器灵敏度提高;由理论曲线可知,当 $L_0 \geq 6\text{mm}$ 时,曲线迭合,亦即 L_0 的影响趋于饱和;由图7实验曲线可知,当 $L_0 \geq 8\text{mm}$ 时,曲线迭合;由此可见:传感器探头长度取6~8mm为最佳,这样,既可获得最佳温度分辨率,又可减小其体积及热容量,获得较好的热响应特性。

实验中使用会聚氦氖激光束作光源,各曲线均在 $n_2(T) = 1.45 \sim 1.4550$ 间相交;而图6理论曲线是对空间均匀分布激励源(朗伯辐射面)这一理想情况模拟所得,所以两图结果不同。为了更真实地模拟实验条件,可对模型进行修正,只要将式(11)中功率分布函数

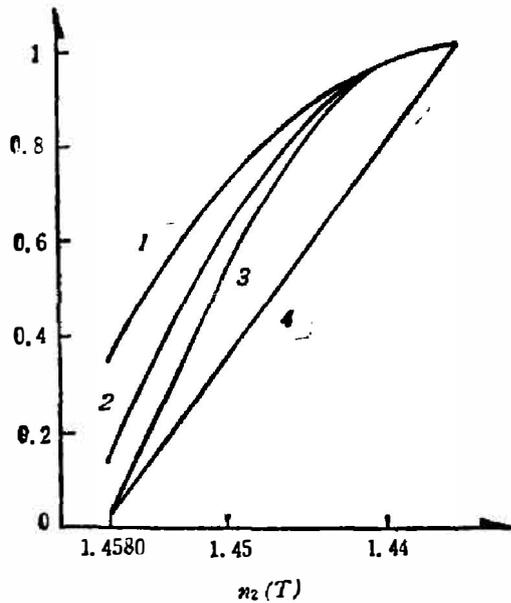


图 6 按式(11)模型计算的理论曲线
1— $L_0=1.5$ mm; 2— $L_0=3$ mm;
3— $L_0=6$ mm; 4—射线光学模型

Fig. 6 Theoretical curves based on the model of Eq. (11).

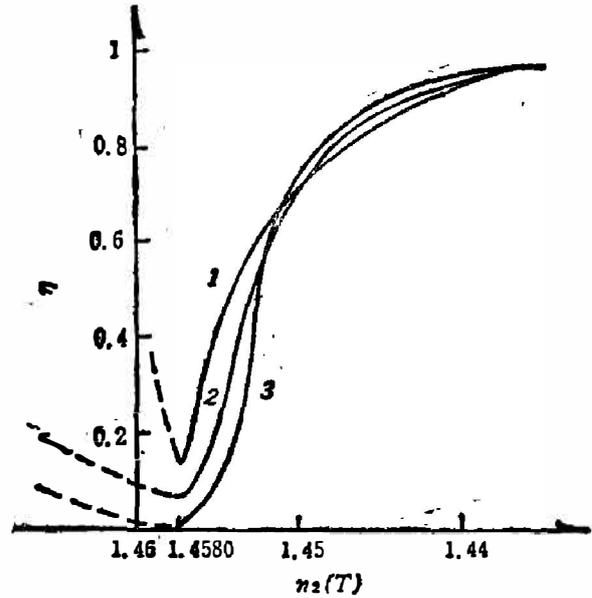


图 7 实验曲线
1— $L_0=1.5$ mm; 2— $L_0=3$ mm;
3— $L_0 \geq 8$ mm

Fig. 7 Measured transmitted intensity for three different lengths of modified cladding sensors.

$\psi(\bar{\beta}, \bar{l})$, 用光源辐射空间分布因子 $\psi(\bar{\beta}, \bar{l})\eta(\bar{\beta}, \bar{l})$ 加以修正即可。

将图(6)、(7)中传输曲线与温敏折射率包层材料的折射率温度曲线(直线, 如图1中 $n_2(T)$ 曲线):

$$n_2(T) = n_1 - \left| \frac{dn_2(T)}{dT} \right| (T - T_0)$$

组合, 还可分析出 $n_2(T)$ 及 $\left| \frac{dn_2(T)}{dT} \right|$ 等参数对传感器温度灵敏的影响, 也可直接将上式代入模型式(11)导出。分析发现: 传感器温度灵敏度:

$$N = |dP_r(L_0, T)/dT|$$

受 $L_0, n_2(T), \left| \frac{dn_2(T)}{dT} \right|$ 等多参数的影响; 其中, $\left| \frac{dn_2(T)}{dT} \right|$ 的影响最为显著, 因此, 高 $\left| \frac{dn_2(T)}{dT} \right|$ 值温敏折射率包层材料的选配对高性能医用光纤温度传感器的研制至关重要, 我们在大量实验研究的基础上, 选配了一种颇为理想的有机混合液作为传感器温敏包层, 其折射率温度方程为:

$$n_2(T) = 1.4580 - 6.8 \times 10^{-4} (T - 30^\circ\text{C}).$$

此外, 还可看到, 适当选取传感器探头诸参数, 可使传感器在 $35 \sim 45^\circ\text{C}$ 间获得较好的线性输出特性, 因而为传感器整机信号处理的设计带来很大的方便。

4. 结 论

以上从多模光纤功率传输损耗的角度出发,分析了折射率温度敏感式光纤温度传感器的温敏光传输特性,并首次实现了其主要参数的计算机模拟及优化选取。在上述模型指导下所设计的传感器,温度分辨率 $\Delta T \leq 0.1^\circ\text{C}$,最佳分辨率可达 0.04°C ,优于医用光纤温度传感器的设计要求。

参 考 文 献

- [1] Gerner E. W., Boone R. et al., *Cancer Res.*, **36** (1976), 1035.
- [2] Oetas T. O. and Connor W. G., *Med. Phys.*, **5**(1978), 2: 79.
- [3] Scheggi A. M., et al., *IEE PROCEEDINGS*, **131**(1984), 4: 270.
- [4] Milton Gottlieb et al., *US Patent* **20** (1980), 4: 203, 326.
- [5] Allan W. Snyder and John D. Love, *Optical Waveguide Theory*, Chapman and Hall, London, 1983, 502.
- [6] Love J. D. and Winkle C., *Opt. & Quant., Elect.*, **10**(1978), 341.
- [7] Snyder A. W. and Love J. D., *IEEE Tran.*, **MTT-23**(1975), 1: 134.

MODIFIED CLADDING REFRACTIVE INDEX DEPENDENT FIBER OPTIC THERMOMETER FOR MEDICAL APPLICATIONS

PAN YINGTIAN, LIU XIANDE

(Department of Optics, Huazhong University of Science & Technology, 430074, Wuhan, Hubei, China)

ABSTRACT

Based on the light transmission loss effect of the probe induced by the change of refractive index of a thermosensitive cladding, a temperature dependent fiber optic transmission model is proposed, which is used to analyse the influence of the related parameters of the probe on the sensitivity of a modified cladding fiber optic temperature sensor. An experimental sensor has been designed and set up. The measured temperature resolution is $\Delta T \leq 0.1^\circ\text{C}$, and the optimum value is $\pm 0.04^\circ\text{C}$ in the temperature range $35 \sim 45^\circ\text{C}$.