

基于双面金属包覆光波导的传感器温度特性研究及实验验证

罗雪雪 陈家璧 胡金兵 梁斌明 蒋强

Analysis and experimental investigation of the temperature property of sensors based on symmetrical metal-cladding optical waveguide

Luo Xue-Xue Chen Jia-Bi Hu Jin-Bing Liang Bin-Ming Jiang Qiang

引用信息 Citation: [Acta Physica Sinica](#), 64, 234208 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.234208

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.234208>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I23>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

一种简单精准的渐变折射率分布光波导分析方法

[A simple and exact method to analyze optical waveguide with graded index profile](#)

物理学报.2015, 64(14): 144205 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.144205>

准晶体结构光纤表面等离子体共振传感器特性研究

[Quasi-crystal photonic fiber surface plasmon resonance sensor](#)

物理学报.2015, 64(6): 064213 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.064213>

光晶格动量依赖偶极势中原子运动

[Atom movement in momentum dependent light dipole lattices](#)

物理学报.2013, 62(14): 144202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.144202>

基于一维间距调制型光子晶格的光传输现象

[The beam propagation based on one-dimensional separation modulated photonic lattices](#)

物理学报.2013, 62(6): 064217 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.064217>

基于耦合介质纳米线的深亚波长局域波导

[Dielectric waveguide with deep subwavelength mode confinement based on coupled nanowires](#)

物理学报.2011, 60(9): 094214 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.60.094214>

# 基于双面金属包覆光波导的传感器温度特性研究 及实验验证\*

罗雪雪 陈家璧<sup>†</sup> 胡金兵 梁斌明 蒋强

(上海理工大学, 上海现代光学系统重点实验室, 上海 200093)

(2015年6月2日收到; 2015年7月21日收到修改稿)

双面金属包覆波导结构(SMCW)是由一层介质波导层被两层金属膜层上下包覆的一种新型波导结构; 本文基于金属层和介质层材料的热-光效应和热膨胀作用, 研究了双面金属包覆波导结构的温度特性. 计算分析的结果表明, 金属膜层的厚度、金属的介电系数、波导层的厚度及其介电常数几乎都与温度变化成比例, 同时, 对双面金属包覆波导结构的波导功能起主要影响的是介质层的厚度值随温度的变化. 本文分别在光谱模式和角度模式下研究双面金属包覆波导结构的反射特性, 并将其应用于基于双面金属包覆波导结构的传感器, 其灵敏度约为  $21.89 \text{ pm/K}$ (光谱模式) 和  $1.449 \times 10^{-3} \text{ rad/K}$ (角度模式). 最后, 本文对角度模式的模拟分析进行了实验验证, 实验验证结果与模拟分析结果基本一致, 实验所用 SMCW 样品的平均灵敏度约为  $0.517 \times 10^{-3} \text{ rad/K}$ , 与模拟分析的灵敏度结果同一量级. 双面金属包覆波导结构的传感器对温度非常敏感, 且该结构的物理构造简单, 成本低, 具有非常大的潜在应用价值.

**关键词:** 双面金属包覆光波导, 传感器, 温度特性

**PACS:** 42.82.Et, 42.81.Pa

**DOI:** 10.7498/aps.64.234208

## 1 引言

随着工业文明的不断发展, 越来越多的领域对反应快速且灵敏的传感器的需求很迫切, 如食品安全、环境监测、生物化学检测和医疗保健等领域<sup>[1-3]</sup>. 研究人员致力于各类型的传感器的研究<sup>[4]</sup>, 最早被提出的是以表面等离子体(SPR)技术为代表的小型传感器<sup>[5,6]</sup>; 这类传感器的共同特点是传感区位于倏逝场区域, 因为倏逝场的迅速衰减, 所以这类传感器的灵敏度受到很大的限制. 2003年, 由Li等提出了基于双面金属包覆光波导(symmetric metal cladding waveguide, SMCW)结构的传感器<sup>[7,8]</sup>, 此结构因其自由空间耦合技术及超高阶模激发等特点获得了广泛的关注<sup>[9,10]</sup>. 自由耦合技术即是入射光波直接从自由空间耦合

进波导层的一种技术<sup>[11]</sup>, 相较于端面耦合、棱镜耦合、光栅耦合及渐变膜耦合技术<sup>[12]</sup>, 自由空间耦合技术具有更高的灵敏度, 且结构简单. 当波导层材料的厚度达到亚毫米量级时, 双面金属包覆波导中便可激发超高阶导模<sup>[13]</sup>, 超高阶导模的特点是对偏振不敏感, 而对入射光波长、波导层厚度及折射率非常敏感. 基于以上分析可知, 双面金属波导结构在光学器件领域有非常大的应用价值; 2009年, Chen等在双面金属包覆波导结构表面测得了古斯-汉森位移<sup>[14]</sup>, 并且通过改变上层金膜的厚度, 可以测得负的古斯-汉森位移, 即能产生逆古斯-汉森位移效应. 此外双面金属包覆波导结构也具有其他广泛的应用, 如窄带滤波器<sup>[15]</sup>、位移传感器<sup>[16]</sup>、生物传感器等等<sup>[17]</sup>.

2013年, Wang等提出了基于超高阶模增强古

\* 国家自然科学基金(批准号: 11104184, 61308096)、国家重点基础研究发展计划(批准号: 2011CB707504)和青年学者国家自然科学基金(批准号: 61308096).

<sup>†</sup> 通信作者. E-mail: jchenk@163.com

斯-汉森效应的高灵敏度温度传感器<sup>[18]</sup>,这是自双面金属包覆波导结构提出后首次对该结构的温度特性进行研究.通常双面金属包覆光波导结构的波导层材料为玻璃材料,玻璃材料具有很强的热-光效应和热膨胀效应,同时,金属的介电常数是复数且是入射光波长的函数,所以,当环境温度发生变化时,双面金属包覆光波导结构的结构参数必然会发生相应的变化,并且入射光波的共振条件也会发生改变.因此,当利用双面金属包覆光波导传感器测量微小物理量时,考虑环境温度变化对其的影响是非常有必要的.

本文基于金属层和介质层材料的热-光效应和热膨胀作用,全面深入研究了SMCW结构的温度特性.首先,研究温度对双面金属包覆光波导结构的金属层和波导层的材料参数的影响,这其中主要有四个影响因素,分别是导波层的折射率和厚度,以及金属膜层的介电系数和厚度;其次,研究入射角度一定时,不同温度条件下发生共振的入射光波长的改变,及入射光波长一定时,发生共振的入射角度随温度变化时的迁移;并且比较了几种具有不同热膨胀系数和热-光系数的光学玻璃,可为温度敏感型的双面金属包覆光波导结构传感器的玻璃材料的选择提供参考.最后,根据前期的模拟分析,对角度模式下的模拟分析结果进行了实验验证.

## 2 理论计算

双面金属包覆光波导结构是由一层平板玻璃被上下两层不同厚度的金属膜层包覆构成的,如图1所示.玻璃平板(H-K9L)的厚度为亚毫米级,作为整个结构的波导层;金属膜为金膜,上层金膜的厚度为38 nm,作为包覆层和耦合层;下层金膜的厚度稍大,约为200 nm,作为反射层和基板;从上到下,分别用 $\epsilon_j, n_j, h_j (j = 1, 2, 3)$ 表示介电系数、折射率和厚度.

不同于表面等离子体(SPR)共振的倏逝场原理<sup>[4,5]</sup>,双面金属包覆波导(SMCW)的共振是振动场原理,因此,基于双面金属包覆波导结构的温度传感器具有更大的灵敏度.双面金属包覆光波导结构的反射率公式为<sup>[19]</sup>

$$R = \{r_{01} - r_{01}r_{12}^2 \exp(2\kappa_2 h_2) + r_{12} [1 - \exp(2\kappa_2 h_2)] \exp(2\kappa_1 h_1)\}^2 \times \{1 - r_{12}^2 \exp(2\kappa_2 h_2)\}$$

$$+ r_{01}r_{12} [1 - \exp(2\kappa_2 h_2)] \times \exp(2\kappa_1 h_1)\}^{-2}, \quad (1)$$

$$r_{ij} = \begin{cases} \frac{\kappa_i - \kappa_j}{\kappa_i + \kappa_j}, & \text{TE,} \\ \frac{\epsilon_j \kappa_i - \epsilon_i \kappa_j}{\epsilon_j \kappa_i + \epsilon_i \kappa_j}, & \text{TM,} \end{cases} \quad (2)$$

$$\kappa_j = k_0 \sqrt{\epsilon_j - n_{\text{air}} \sin \theta}, \quad (3)$$

$\kappa_j$ 和 $k_0$ 分别是器件中的标准波数和真空中的波数.由于金膜的介电系数是复数,且其实部相对于虚部是一个绝对值很大的负数,所以导模的有效折射率 $N = \beta/k_0$ 的取值范围可以很大,介于0和无穷大之间,这比介质波导可取到的取值范围大得多;入射光波的入射角度也可在 $0^\circ$ 到 $90^\circ$ 内任意取值.根据计算分析结果,反射光谱中有大量的吸收峰,这说明双面金属包覆光波导结构能激发大量的导模(通常0.2 mm厚的导波层有1000多个导模).当入射角较大时,模式密度会很大以至于导模间相互不能够被分辨,相反,当入射角接近于 $0$ 时,模式密度会变得越来越稀疏<sup>[12]</sup>.

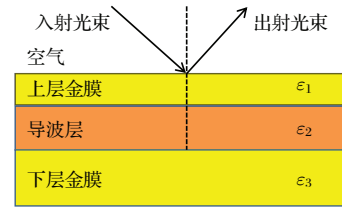


图1 (网刊彩色) 双面金属包覆光波导结构

Fig. 1. (color online) Structure of the SMCOW.

贵金属(金、银、铜等)的介电系数很复杂且随入射光的频率变化,通常是用传统Drude模型来计算贵金属的介电系数.但是当入射光的波长处于可见光波长范围内时,传统Drude模型不能提供完全准确的结果.为了获得精确的结果,需对可见光波长范围内的传统Drude模型做如下的修正<sup>[20]</sup>:

$$\epsilon_1(\omega) = \epsilon_\infty - \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega + i\omega_c)}, \quad (4)$$

$\epsilon_\infty$ 是指频率趋向无穷时的介电常数, $\omega_c$ 是随温度变化的碰撞频率<sup>[16]</sup>, $\omega_p$ 表示等离子体频率<sup>[21]</sup>.如果将温度变化导致的金属膜的热膨胀考虑在内,金属膜的厚度表达式<sup>[21]</sup>为

$$h_1(T) = h_{10} \exp \left\{ \int_{T_0}^T \alpha_L(T) dT \right\}, \quad (5)$$

$h_{10}$ 是金属膜在室温下的膜厚, $\alpha_L(T)$ 是块状金属的线性热膨胀系数<sup>[22]</sup>.

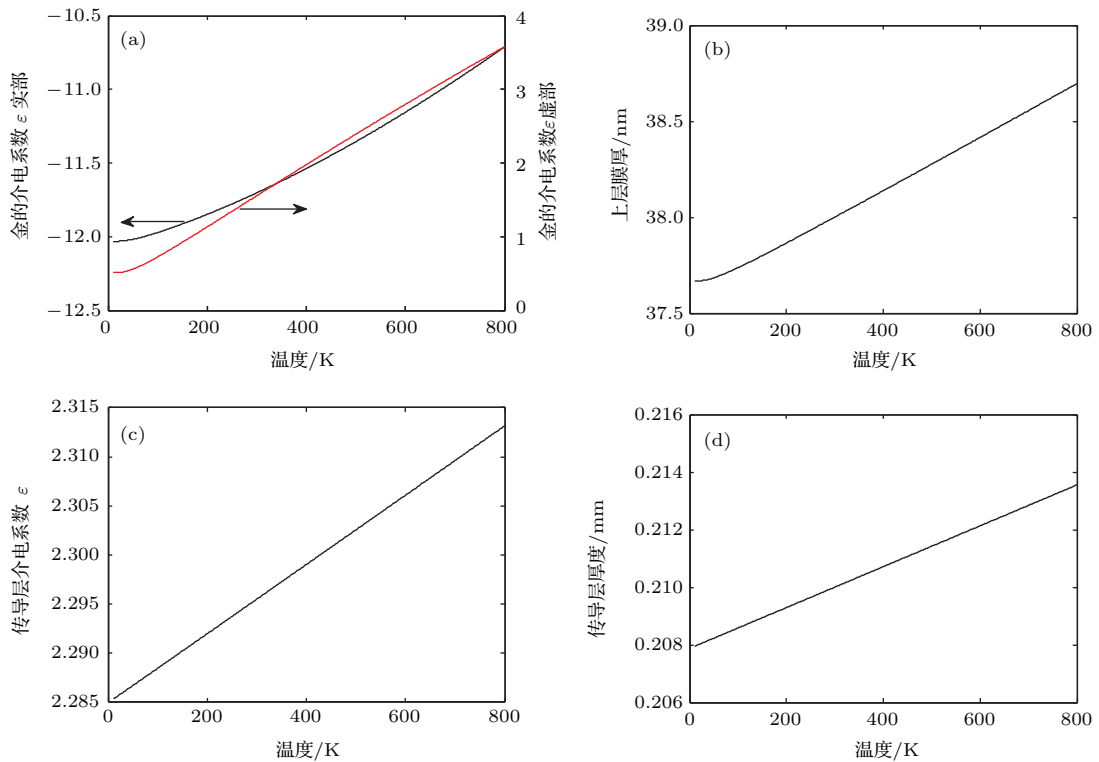


图2 (a) 金属膜的介电常数, (b) 金膜的上层厚度, (c) 导波层的介电系数和 (d) 导波层厚度各值随温度的变化 (入射光波长为 632.8 nm)

Fig. 2. Variations of (a) permittivity of gold film (b) thickness of gold film (c) permittivity of guiding layer (d) thickness of guiding layer with temperature. The incident wavelength is 632.8 nm.

如图 2(a) 和 (b) 所示, 金属膜的介电常数和厚度与温度几乎都成线性变化关系. 接下来, 分析波导层的温度特性, 波导层通常所用的材料是光学玻璃. 对光学玻璃而言, 折射率的温度特性可以表示为

$$n(T) = n(T_0) + (T - T_0) \frac{dn}{dT}, \quad (6)$$

$n(T_0)$  是导波层在室温下的折射率,  $dn/dT$  是导波层的热光系数. 考虑到玻璃的热膨胀系数 ( $\alpha$ ) 的温度特性, 导波层的厚度  $h_2$  可表示 [21] 为

$$h_2(T) = h_2(T_0)(1 + (T - T_0)\alpha), \quad (7)$$

$h_2(T_0)$  是导波层在室温下的厚度.

与金属膜层的情况类似, 导波层的介电系数和厚度与温度也是成比例的, 如图 2(c) 和 (d) 所示. 公式中的部分参数从参考文献 [20, 21, 23] 中选取.

### 3 模拟分析与讨论

根据以上的分析和 (1) 式, 可以推断, 一旦温度发生变化, 反射光谱的吸收峰将会相应地有所偏

移, 即共振的光波长或者共振入射角度发生改变, 因此, 本文对超高阶模的共振波长及共振角度的温度特性进行了模拟研究. 从图 3(a) 和图 4(a) 中可以看出, 当温度发生非常小的波动变化时, 反射光谱的吸收峰便会发生偏移, 可见双面金属包覆光波导结构对环境温度非常敏感. 基于 (4)–(7) 式, 主要有四个因素对双面金属包覆光波导结构的反射率构成影响. 为了确定起主要作用的影响因素, 下面分别计算讨论了导波层的折射率和厚度以及金属层的厚度和介电系数随温度的变化情况.

经过计算可得共振波长的偏移量与温度变化量的比值 (光谱模式下的灵敏度)  $S_\lambda (= d\lambda_{res}/dT)$  约为 21.89 pm/K, 这比普通平板介质波导大的多. 如图 3(b)–(e) 所示, 可以看到导波层的厚度值随温度增长有明显的改变, 对共振波长的迁移贡献也最大, 厚度值改变量与对应的共振波长迁移量的比值  $S_\lambda$  则为 21.30 pm/K; 其次便是导波层的折射率, 它的  $S_\lambda$  值为 0.3908 m/K; 此外, 金属层的温度特性几乎对共振波长的迁移不起任何作用.

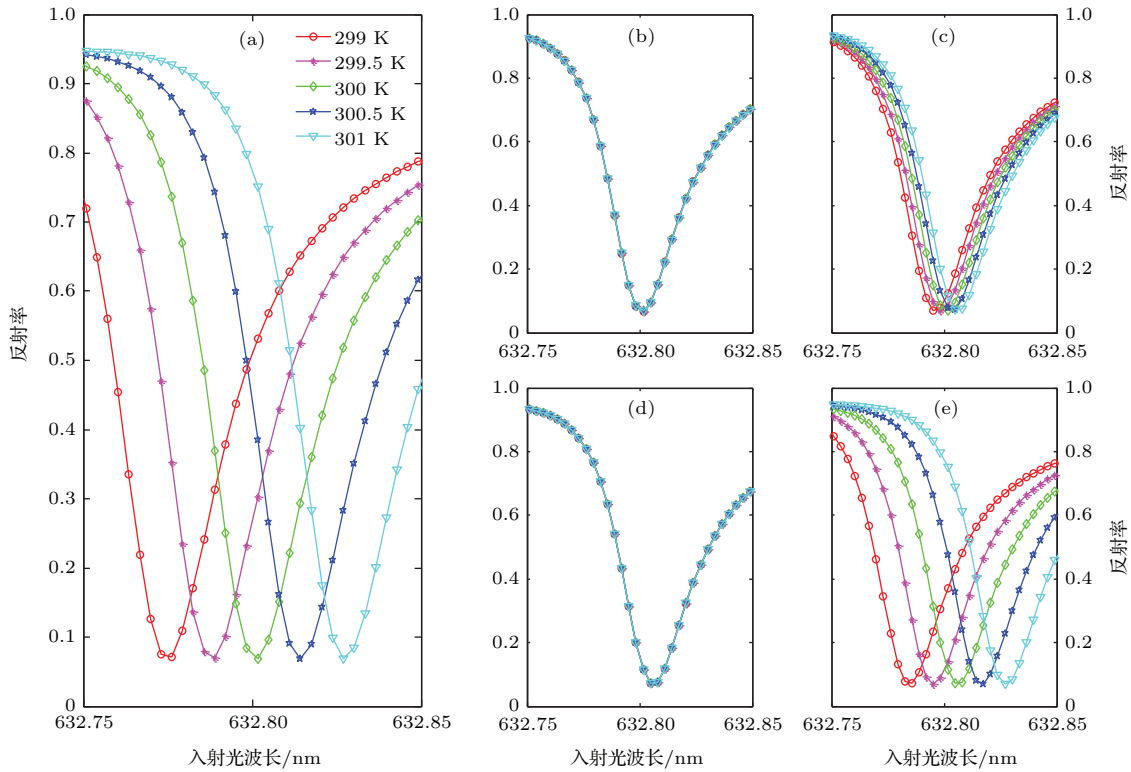


图3 (网刊彩色) (a)  $\epsilon_1, h_1, \epsilon_2, h_2$ , (b)  $\epsilon_1$ , (c)  $\epsilon_2$ , (d)  $h_1$ , (e)  $h_2$  随温度的变化时光谱模式的反射率变化, 入射角为  $3.5^\circ$   
 Fig. 3. (color online) The reflectivity under spectral interrogation mode with variation of (a)  $\epsilon_1, h_1, \epsilon_2, h_2$ , (b)  $\epsilon_1$ , (c)  $\epsilon_2$ , (d)  $h_1$ , (e)  $h_2$  with temperature taken into accounted. The incident angle is  $3.5^\circ$ .

如前所述, 双面金属包覆光波导结构的反射率不仅与入射光波长有关, 更与入射角度有关. 接下来便分析入射光波长为 632.8 nm, 温度变化时共振入射角度的变化情况. 使用与上述计算光谱模式(角度不变, 共振光波长变化)类似的方法来计算角度模式(入射光波长不变, 入射角度变化), 结果如图 4(a)—(e) 所示. 模拟的结果与光谱模式基本无异, 共振角度随温度的单位增长而单位迁移. 角度与温度变化量的比值(角度模式下的灵敏度)  $S_{ang}(= d\theta/dT)$  为  $1.449 \times 10^{-3}$  rad/K, 灵敏度得到明显提高. 仔细分析图 4(b)—(e) 可以获得类似的结论: 温度变化时导波层的厚度变化对共振角度的迁移的贡献最大, 相应的  $S_{ang}$  值为  $1.400 \times 10^{-3}$  rad/K. 同样, 金属层的温度特性对共振角度的迁移几乎不起作用. 通过以上分析, 可以得出, 对双面金属包覆光波导结构的温度特性起关键作用的是导波层的温度效应, 特别是导波层材料的热膨胀作用. 因此, 在设计温度敏感型的双面金属包覆光波导传感器时, 应当选择热膨胀系数( $\alpha$ )和热光系数( $dn/dT$ )尽可能大的光学玻璃作为导波层的材料.

表 1 列出了几种玻璃的  $\alpha$  值和  $dn/dT$  值, 以及相应的  $S_\lambda$  和  $S_{ang}$  值. 如果基于双面金属包覆光波导结构的温度传感器工作在光谱模式下时, 那么 H-FK61 玻璃是个合适的选择来作为导波层的材料, 因为其有较大的  $S_\lambda$  值; 相反, 如果基于双面金属包覆光波导结构的温度传感器工作在角度模式下, 那么 H-LaK52 玻璃因其较大的  $S_{ang}$  值则可作为最佳材料的选择.

表 1 不同光学玻璃的  $\alpha$  值和  $dn/dT$  值及相应的  $S_\lambda, S_{ang}$  值

Table 1. optical glasses with different  $\alpha, dn/dT$  and the corresponding  $S_\lambda, S_{ang}$ .

Index	$\alpha$ /( $10^{-7}/K$ )	$dn/dT$ /( $10^{-6}/K$ )	$S_\lambda$ /(pm/K)	$S_{Sang}$ /( $10^{-3}$ rad/K)
H-K9L	83	1.16	21.89	1.449
H-ZF62	68	-0.9	19.54	1.791
F2	105	0.9	32.24	2.473
H-ZPK2	91	-2.4	26.38	1.620
H-FK61	141	-6.6	40.06	2.132
H-QK3L	96	-2.1	28.33	1.876
F6	101	1.0	30.29	2.814
H-ZK7	65	1.7	20.52	1.620
H-LaK52	60	2.5	19.54	3.411

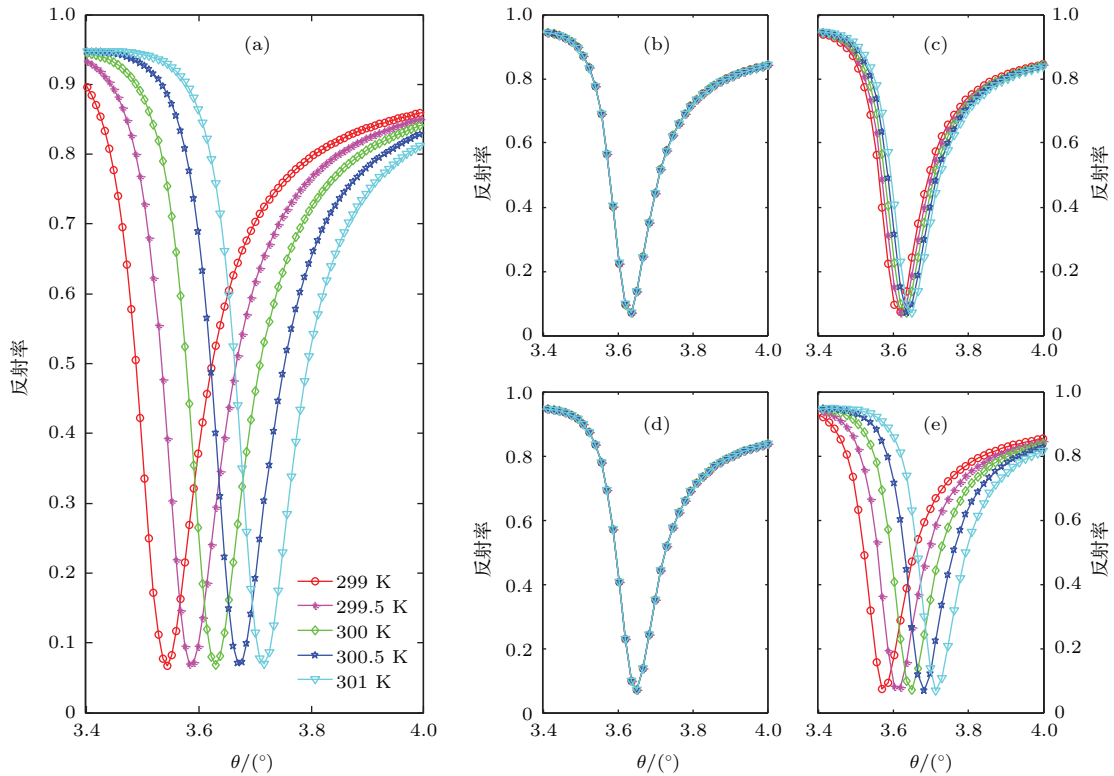


图4 (网刊彩色) (a)  $\epsilon_1, h_1, \epsilon_2, h_2$ , (b)  $\epsilon_1$ , (c)  $\epsilon_2$ , (d)  $h_1$ , (e)  $h_2$  温度变化时角度模式下反射率的变化, 入射光波长为 632.8 nm

Fig. 4. (color online). The reflectivity under angular interrogation mode with variation of (a)  $\epsilon_1, h_1, \epsilon_2, h_2$ , (b)  $\epsilon_1$ , (c)  $\epsilon_2$ , (d)  $h_1$ , (e)  $h_2$  with temperature taken into account. The incident wavelength is 632.8 nm.

### 4 实验验证

根据前期的理论模拟分析, 首先, 在 300 K (23 °C) 室温条件下进行了角度模式的 SMCW 结构温度传感器的实验验证, 实验装置如图 5 所示. He-Ne 激光作光源, 光束的束腰位置处于出射镜上, 为了保证光束入射到 SMCW 表面的光能量足以激发超高阶模且发散角最小, 考虑使用束腰处的光点入射到 SMCW 表面, 实验中使用 4f 系统将激光出射镜处的束腰成像到 SMCW 表面. 光从光源 (位于 4f 系统的前焦平面位置处) 出射后经过由同焦距的  $L_1$  和  $L_2$  透镜构成的 4f 系统, 然后由平面镜反射后入射到 SMCW 结构的上层金膜上; SMCW 样品黏贴在温度控制器的工作面上, 并与该温度控制器一起放置在由计算机控制的旋转平台上; 被 SMCW 反射的光束由 PSD (位置敏感光接收器) 接收; PSD 输出的是 0—10 V 的电压值 (最小分辨率为 0.1 V, 且有  $4 \times 10^3$  V/A— $4 \times 10^6$  V/A 四个放大级别). 通过转动旋转平台可以改变光束入射角, PSD 接收不

同入射角的反射光束, 并通过计算机以电压值的形式输出.

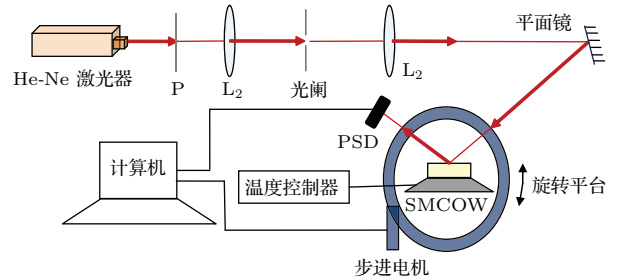


图5 (网刊彩色) 测量 SMCW 结构的反射率的实验装置图

Fig. 5. (color online) Experimental setup for measuring reflection spectrum of SMCW. PSD: photodiode,  $L_1$ : lens 1,  $L_2$ : lens 2.

实验结果与理论计算结果的对比如图 6 所示, 实验中使用的 SMCW 样品的导波层为 K-9L 玻璃, 其上层金膜膜厚约为 48 nm (由椭偏仪测得). 利用该测量厚度值并依据前面的理论分析建立模型, 使用其他计算参数:  $n_{\text{air}} = 1.0$ ,  $\epsilon_1 = \epsilon_3 = -11.74 + i1.261$ ,  $\epsilon_2 = 2.295$  和  $h_1 = 48$  nm, 计算得出温度恒定, 不同入射角时样品的反射率的

变化如图6中蓝线所示. 实验对从4.5°到7°入射角的光束反射率进行了测量, 测量值如红线所示, 从图中可以看出, 理论计算和实验测量值吻合的很好, 都在5°的入射角附近处激发第二高阶模和6.5°入射角附近激发第三高阶模; 两者的共振角度的微小差异可能是因为实验样品在室温条件300 K的介电系数参数与模拟情况下的参数不完全一致, 存在细小差别所致.

为了更全面的验证模拟分析的结果, 实验测量了320—360 K温度范围内的共振角度值. 图7(a)是取320 K, 340 K, 360 K三个温度值的测量结果画图, 图7(b)是对所有数据进行了线性拟合. 由图7(a)可知, 随着温度的增加, 各高阶模的共振角度都发生了迁移, 且是往大角度迁移, 这与角度模式的模拟分析结果一致; 根据对实验数据的分析, 温度每变化20 K, 第一个高阶模的共振角度迁移约为0.59°, 而第二和第三高阶模的角度迁移分别为0.48°和0.39°, 同一高阶模, 温度变化量相同时, 相应的共振角度迁移量也一样; 且随着模式数的增大, 角度迁移量有减小的趋势.

基于以上的实验结果, 可以确定基于SMCW结构的温度传感器的方案的可行性. 根据图7(b)的拟合结果可得共振角度与温度的关系式:  $\Delta\theta =$

$0.02965 \times \Delta T$ , 平均灵敏度值约为  $0.517 \times 10^{-3}$  rad/K, 这样即可根据共振角度的迁移量判断外界温度的变化量, 达到温度传感的作用.

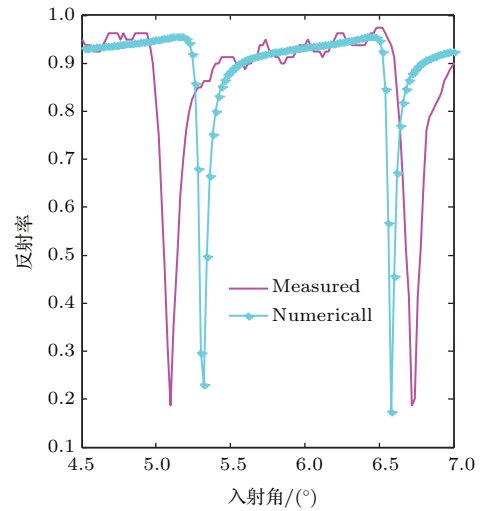


图6 (网刊彩色) 300 k 温度时测得实验反射率与理论计算值对比 (第二与第三高阶导模)

Fig. 6. (color online) Experimental reflection spectrums (red curve) of the second and third ultrahigh order guided modes of SMCW in angular interrogation at room temperature 300 K, along with numerical calculation (blue curve). The parameters used in numerical calculation are as follows:  $n_{\text{air}} = 1.0$ ,  $\epsilon_1 = \epsilon_3 = -11.74 + i1.261$ ,  $\epsilon_2 = 2.295$  and  $\lambda_{\text{air}} = 632.8$  nm.

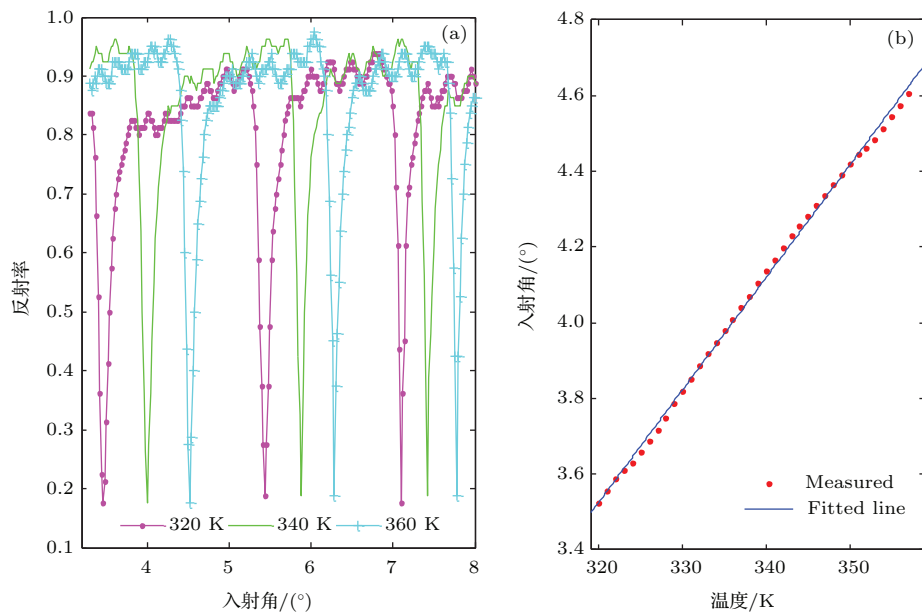


图7 (网刊彩色) (a) 温度分别为320 K(紫色) 340 K(绿色) 360 K(蓝色) 时, 实验测得的反射率结果; (b) 320—360 K 温度范围内共振角度值及其拟合曲线

Fig. 7. (color online) (a) Experimental results of reflection spectrum of the first three ultrahigh order guided modes of SMCW in angular interrogation with ambient temperature being 320 K (blue), 340 K (red) and 360 K (purple), respectively. (b) The shift of resonance angle vs. the variation of temperature from 320 K to 358 K (red dot) and fitted line (blue line).

## 5 结 论

本文简要介绍了新型的双面金属包覆波导结构, 并且基于构成该结构的金属膜层和波导层材料的热-光效应与热膨胀作用, 分析了双面金属包覆光波导结构在光谱模式和角度模式下的温度特性. 其中共振波长的偏移量与温度变化量的比值  $S_\lambda (= d\lambda_{\text{res}}/dT)$  约为 21.89 pm/K, 共振角度的偏移量与温度变化量的比值  $S_{\text{ang}} (= d\theta/dT)$  为  $1.449 \times 10^{-3}$  rad/K, 这比普通平板介质波导的灵敏度要大得多, 实验验证与模拟分析结果基本一致, 平均灵敏度值约为  $0.517 \times 10^{-3}$  rad/K, 为后续对正、负古斯-汉欣位移的实验测量提供了有利的依据.

## 参考文献

- [1] Lin Y, Lu F, Tu Y, Ren Z 2007 *Nano Lett.* **4** 191
- [2] Bornhop D J, Latham J C, Kussrow A, Markov D A 2007 *Science* **317** 1732
- [3] McDonagh C, Burke C S, MacCraith B D 2008 *Chemical Reviews* **108** 400
- [4] Huang C J, Dostalek J, Sessitsch A, Knoll W 2011 *Analytical Chemistry* **83** 674
- [5] Homola J 1997 *Sensors and Actuators B: Chemical* **41** 207
- [6] Guo Q L, Goodman D W 2001 *Chin. Phys. B* **10** 80
- [7] Zhi Feng Z, Xiao Ming T 2013 *Photonics Technology Lett.* **25** 310
- [8] Li H G, Cao Z Q, Lu H, Shen Q 2003 *Appl. Phys. Lett.* **83** 2757
- [9] Lu H, Cao Z, Li H, Shen Q 2004 *Appl. Phys. Lett.* **85** 4579
- [10] Feng Y J, Cao Z Q, Chen L, Shen Q S 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 4709 (in Chinese) [冯耀军, 曹庄琪, 陈麟, 沈启舜 2006 物理学报 **55** 4709]
- [11] Chen F, Hao J, Li H G, Cao Z Q 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 074223 (in Chinese) [陈凡, 郝军, 李红根, 曹庄琪 2011 物理学报 **60** 074223]
- [12] Xiao P P 2012 *Ph. D. Dissertation*(Shanghai: Shanghai Jiao Tong University) (in Chinese) [肖平平 2012 博士学位论文 (上海: 上海交通大学)]
- [13] Cao ZH Q, Lu H F, Li H G 2006 *Acta. Opt. Sin.* **26** 497 (in Chinese) [曹庄琪, 陆海峰, 李红根 2006 光学学报 **26** 497]
- [14] Chen L, Zhu Y M, Zhang D W 2009 *Chin. Phys. B* **18** 4875
- [15] Chen G, Cao Z, Gu J, Shen Q 2006 *Appl. Phys. Lett.* **89** 081120
- [16] Chen F 2005 *Opt Express* **13** 10061
- [17] Li H G, Cao Z, Lu H, Shen Q 2006 *Chin. Phys. Lett.* **23** 643
- [18] Wang X P, Cheng Y, Sun J J, Li H G, Cao ZH Q 2013 *Opt. Express* **21** 13380
- [19] Chen L, Zhu Y, Peng Y, Zhuang S 2010 *Journal of Optics.* **12** 075002
- [20] Vial A, Grimault A S, Macías D, Barchiesi D, de la Chapelle M L 2005 *Phys. Rev. B* **71** 085416
- [21] Sharma A K, Gupta B D 2006 *Appl Optics.* **45** 151
- [22] Kai-Qun L 2007 *Chin. Phys. Lett.* **24** 3081
- [23] Holzapfel W B, Hartwig M, Sievers W 2001 *J. Phys. Chem. Ref. Data* **30** 515



# Analysis and experimental investigation of the temperature property of sensors based on symmetrical metal-cladding optical waveguide\*

Luo Xue-Xue Chen Jia-Bi<sup>†</sup> Hu Jin-Bing Liang Bin-Ming Jiang Qiang

(University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai Key Lab of Modern Optical System, Shanghai 200093, China)

( Received 2 June 2015; revised manuscript received 21 July 2015 )

## Abstract

Symmetrical metal-cladding waveguide (SMCW) is a kind of new waveguide construction, and it consists of a planar glass slab sandwiched in two metal films with different thicknesses. The metal in this structure is usually a noble metal, such as Au, Ag and Cu etc. One of the characteristics of the glass is the sub-millimeter thickness, which is useful for exciting the ultrahigh order mode. Since the SMCW structure was proposed, it has received much attention from the researchers for its excellent characteristics of free-space coupling technique and ultrahigh order mode excitation. This free-space coupling technology has a higher sensitivity compared with the end-face coupling, prism coupling and grating coupling techniques. The ultrahigh order mode is very sensitive to the incident light wavelength, the thickness of guiding layer and the refractive index, but not sensitive to polarization. Based on the thermal-optical effect and thermal expansion effect of metal film and guiding layer materials, we research the temperature property of the SMCW structure. Researching methods include simulation analysis and experimental demonstration. First, we calculate the relation of the thickness and dielectric property of metal films, and the thickness and refractive index of the guiding layer with the temperature. Results show that these four factors are nearly proportional to the temperature difference. Then, we simulate the relationship of the reflectivity of the SMCW structure with those four factors by means of single-factor investigation under spectral and angular interrogation mode of operation, and find that the temperature-dependence of thickness of the guiding layer makes the chief contribution to the waveguide function of SMCW. Meanwhile, we analyze the sensitivity of the sensors based on SMCW structure, and the result shows that the sensitivity of this kind of sensor can be up to 21.89 pm/K (spectral mode) and  $1.449 \times 10^{-3}$  rad/K (angular mode). Finally, we demonstrate the simulation results by experiment. In our experiment, a series of reflectivity is measured at temperatures varying from 320 to 380 K, and the value is expressed in the form of voltage output of PSD (position sensitive diode). The sensor shows a good linearity and a high average resolution of  $0.517 \times 10^{-3}$  rad/K; furthermore, we fit the experimental data and get the linear function between angle shifts and temperature difference of  $\Delta\theta = 0.02965 \times \Delta T$ . So, once the temperature has any minute variation, it will easily give a change in the resonance incident angle and show the effect of sensor. Owing to the advantages of high sensitivity, low cost and easy fabrication, the temperature sensor based on SMCW will be a promising sensor in many fields.

**Keywords:** symmetrical metal-cladding waveguide, sensor, temperature property

**PACS:** 42.82.Et, 42.81.Pa

**DOI:** 10.7498/aps.64.234208

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11104184, 61308096), the National Basic Research Program of China (Grant No. 2011CB707504), and the National Science Foundation for Young Scholars of China (Grant No.61308096).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: [jbchenk@163.com](mailto:jbchenk@163.com)