

doi: 10.3788/gzxb20144307.0723005

# 对称金属包覆波导受温度影响的特性分析

杜瑞, 袁文, 桑明煌, 戴海浪

(江西师范大学 物理与通信电子学院, 南昌 330027)

**摘 要:** 基于对称金属包覆波导, 研究了温度对金属层介电常量及导波层折射率的影响. 通过改变金属介电常量和导波层折射率, 共振角和衰减全反射吸收峰受到影响. 理论和仿真表明: 在入射光波长为 760 nm, 覆盖层银膜厚度为 35 nm, 衬底银膜厚度为 300 nm, 导波层为纯水的条件下, 温度由 10℃ 升高到 70℃ 时, 衰减全反射吸收峰反射率随温度的升高而降低, 吸收率提高; 共振角随温度的升高, 先增加后减小. 当金属介电常量对整体的影响大于纯水时, 共振角增加, 反之, 共振角减小. 因此, 对称金属包覆波导受温度的影响是不可忽略的.

**关键词:** 波导; 温度; 介电常量; 折射率; 共振角

中图分类号: O436.2

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2014)07-0723005-4

## Characteristic Analysis of the Symmetrical Metal-cladding Waveguide Affected by Temperature

DU Rui, YUAN Wen, SANG Ming-huang, DAI Hai-lang

(College of Physics & Communication Electronics, Jiangxi Normal University, Nanchang Jiangxi 330022 China)

**Abstract:** Based on symmetrical metal-cladding waveguide, the effect of temperature on permittivity of metal layer and refractive index of waveguide layer was studied. By changing the metal permittivity and refractive index of waveguide layer, resonance angle and attenuated total reflection absorption peak were affected. Theory and simulations show that as the temperature rises from 10℃ to 70℃, attenuated total reflection absorption peak decreases and absorption rate improves with increased temperature; resonance angle increases and then decreases with increased temperature on the condition that the wavelength of incident light is 760 nm, the thickness of silver film coverage and silver film substrate is 35 nm and 300 nm, the guiding layer is pure water. When the effect of metal permittivity on the overall is greater than pure water, the resonance angle increases. On the contrary, the resonance angle decreases. Therefore, the temperature effect on the symmetrical metal-cladding waveguide can not be ignored.

**Key words:** Waveguides; Temperature; Permittivity; Refractive index; Resonance angle

**OCIS Codes:** 230.7370; 240.0310; 120.6780

## 0 引言

对称金属包覆波导 (the Symmetrical Metal-Cladding Waveguide, SMCW) 由金属覆盖层、导波层、金属衬底组成<sup>[1]</sup>. 由于具有较低的有效折射率, 它对入射光波长、导波层厚度和折射率变化有较高的灵敏度<sup>[2]</sup>, 在波长测量、Goos-Hänchen 位移探测、生物传感

器、有毒物质检测等领域具有广泛的应用前景. 冯耀军通过 SMCW 的实验与数值模拟, 实现了 0.01 pm 数量级的波长检测<sup>[3]</sup>. 王贤平等把磁流体作为 SMCW 的导波层, 通过改变入射光功率, 分析了 Goos-Hänchen 的变化情况<sup>[4]</sup>. 肖平平分别把葡萄糖溶液与大肠杆菌待测液作为 SMCW 的导波层, 通过监测反射光光强变化, 得到 1 ppm 的葡萄糖溶液检测限和 50 cfuL<sup>-1</sup> 的

基金项目: 国家自然科学基金 (Nos. 61265001, 11264016) 和江西省教育厅科技项目 (Nos. GJJ13237, GJJ12172) 资助

第一作者: 杜瑞 (1987-) 男, 硕士研究生, 主要研究方向为导波光学. Email: durui0131@163.com

导师: 袁文 (1972-) 男, 副教授, 主要研究方向为导波光学. Email: yuanwen@jxnu.edu.cn

收稿日期: 2013-10-10; 录用日期: 2014-01-16

<http://www.photon.ac.cn>

大肠杆菌检测限<sup>[5]</sup>. 汪洋等以经过显色反应的六价铬待测液作为 SMCW 的导波层, 通过改变消光系数, 得到六价铬离子的检测限为 1.2 nM<sup>[6]</sup>. 以上实验开展了 SMCW 在传感方面的研究, 但在实际应用中, 还涉及到温度参量的影响. 温度变化对金属薄膜<sup>[7]</sup>、介质折射率<sup>[8]</sup>产生影响, 进而改变金属包覆波导的特性<sup>[9]</sup>. 因此要实现基于 SMCW 的仪器开发, 温度的变化将是一个必须考虑的因素.

本文通过研究温度对金属介电常量和导波层折射率的影响, 分析温度对 SMCW 特性的影响, 得到 SMCW 光强反射率、衰减全反射吸收峰峰值、共振角随温度的变化规律, 为基于 SMCW 的生化传感器、温度传感器等的进一步开发与研究奠定了基础.

## 1 对称金属包覆波导受温度影响的理论分析

对于 SMCW, 其有效折射率在零到导波层折射率之间是一个很小的值, 因此具有很高的灵敏度, 不需要使用大折射率棱镜进行耦合, 可以直接进行自由空间耦合. SMCW 可以产生数以千计的导模, 模序数高的称为高阶导模. 高阶导模的性质可用三个基本的特征参量描述, 即共振角(或共振波长), 半峰全宽和衰减全反射吸收峰峰值. 金属薄膜的介电常量和导波层折射率是影响共振角、半峰全宽和衰减全反射吸收峰的主要因素.

### 1.1 反射率与入射角的关系

对称金属包覆波导由金属覆盖层, 导波层和金属衬底组成, 见图 1. 金属材料取银(Ag), 导波层取纯水, 上层金属的厚度  $d_2 = 35$  nm, 波导层纯水厚度  $d_3 = 0.5$  mm, 下层金属厚度  $d_4 = 300$  nm, 入射光波长  $\lambda = 760$  nm. 工作时, 一束偏振光经过上层银膜, 自由空间

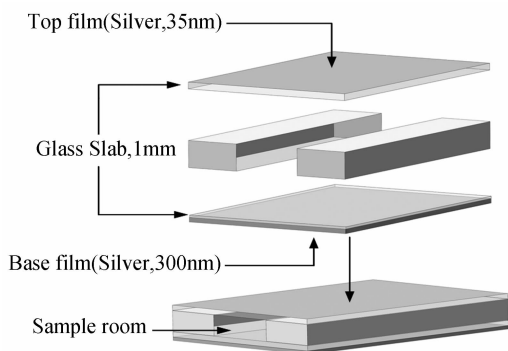


图 1 对称金属包覆波导的结构

Fig. 1 The structure of symmetrical metal-cladding waveguide

耦合进波导层后反射, 根据电磁场边界条件, 可得光强反射率公式为<sup>[12]</sup>

$$R = |r|^2 \quad (1)$$

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

式中  $\theta$  为入射角,  $\lambda$  为入射光波长,  $\epsilon_i = n_i^2$  为介电常量,  $\kappa_i = 2\pi \sqrt{\epsilon_i - \epsilon_i \sin^2 \theta} / \lambda$ ,  $n_i$  为折射率,  $d_i$  为厚度,  $r_{ij}$  为相邻层间的菲涅尔反射系数,  $i, j = 1, 2, 3, 4$  分别表示空气、上层金属膜、导波层、下层金属膜.

$$r = \{r_{12}[1 + r_{23}r_{34} \exp(2i\kappa_3 d_3)] + [r_{23} + r_{34} \exp(2i\kappa_3 d_3)] \exp(2i\kappa_2 d_2)\} / \{1 + r_{23}r_{34} \exp(2i\kappa_3 d_3) + r_{12}[r_{23} + r_{34} \exp(2i\kappa_3 d_3)] \exp(2i\kappa_2 d_2)\} \quad (3)$$

### 1.2 温度变化对金属薄膜的影响

根据修正的 Drude 模型<sup>[10]</sup>, 金属的介电函数<sup>[10]</sup>为

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

式中,  $\epsilon(\infty)$  是高频极限时金属的介电常量,  $\epsilon_c$  是电子的散射(或碰撞)频率,  $\omega_p = \sqrt{\frac{4\pi N e^2}{m_e}}$  是金属材料的等离子体频率,  $N$  是金属自由电子密度,  $m_e$  是自由电子有效质量. 由于金属随温度升高, 总的自由电子数不变的, 由热膨胀而知, 金属体积增大则  $N$  减小.

金属等离子体频率  $\omega_p(T)$  随温度的变化为<sup>[11]</sup>

$$\omega_p(T) = \omega_p(T_0) \exp\left\{-\frac{1}{2} \int_{T_0}^T \alpha_v(T) dT\right\} \quad (5)$$

式中,  $\omega_p(T_0)$  是室温下 300 K 金属材料的等离子体频率,  $\alpha_v(T) = \gamma C_V(T)/K$  是金属的体热膨胀系数,  $\gamma$  是金属材料的格林艾森常量,  $K$  是金属的体变模量,  $C_V(T) = 9Nk_B \left(\frac{T}{T_D}\right)^3 \int_0^{T_D/T} \frac{x^4 e^x}{(e^x - 1)^2} dx$  是金属的定容比热,  $k_B$  是波尔兹曼常量,  $T_D$  是 Debye 温度.

金属电子散射(或碰撞)的频率  $\omega_c(T)$  随温度的变化为<sup>[12]</sup>

$$\omega_c(T) = \omega_0 \left[ \frac{2}{5} + 4 \left( \frac{T}{T_D} \right)^5 \int_0^{T_D/T} \frac{z^4}{e^z - 1} dz \right] + \frac{1}{6} \pi^4 \frac{\Gamma \Delta}{h E_F} \left[ (\kappa_B T)^2 + \left( \frac{h\omega}{4\pi^2} \right)^2 \right] \quad (6)$$

式中,  $\Gamma$  和  $\Delta$  是与金属材料有关的常量, Ag:  $\Gamma = 0.55$ ,  $\Delta = 0.73$ , 式(3)中等式右边第一项是 Holstein 模型<sup>[13]</sup>, 第二项是 Lawrence 模型<sup>[14]</sup>.

### 1.3 温度变化对纯水折射率的影响

纯水的折射率通常用水和蒸汽性质国际协会(IAPWS)确认的国际标准公式<sup>[15]</sup>来描述

$$\frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} (1/\rho) = a_0 + a_1 \bar{\rho} + a_2 \bar{T} + a_3 \bar{\lambda}^2 \bar{T} + \frac{a_4}{\lambda} + \frac{a_5}{\bar{\lambda}^2 - \bar{\lambda}_{UV}^2} + \frac{a_6}{\bar{\lambda}^2 - \bar{\lambda}_{IR}^2} + a_7 \bar{\rho}^2 \quad (7)$$

式中  $T$  为环境温度,  $\rho$  为纯水密度,  $\lambda$  为入射光波长,

$\bar{T}=T/T^*$ ,  $\bar{\rho}=\rho/\rho^*$ ,  $\bar{\lambda}=\lambda/\lambda^*$ .  $T^*$ 、 $\rho^*$ 、 $\lambda^*$ 、 $a_0$ 、 $a_7$ 、 $\bar{\lambda}_{UV}$ 、 $\lambda_{IR}$ 均为常量.

## 2 仿真结果分析

根据式(1)~(4)、(7)可得,在对称金属包覆波导受温度影响的测量中,温度的变化会引起反射率  $R$  的变化.式(3)中,分析了金属介电常量  $\epsilon_i$  与纯水折射率随温度的变化对反射率  $R$  的影响,忽略其他参量的影响.

图2给出了银的热膨胀系数随时间的变化情况<sup>[17]</sup>.可以看出,当温度远高于银的 Debye 温度<sup>[16]</sup> ( $T_D=225\text{ K}$ )时,银的热膨胀系数趋于常量;当温度小于银的 Debye 温度时,银的热膨胀系数变化较剧烈.在温度模型中将金属的热膨胀系数作为变量处理.

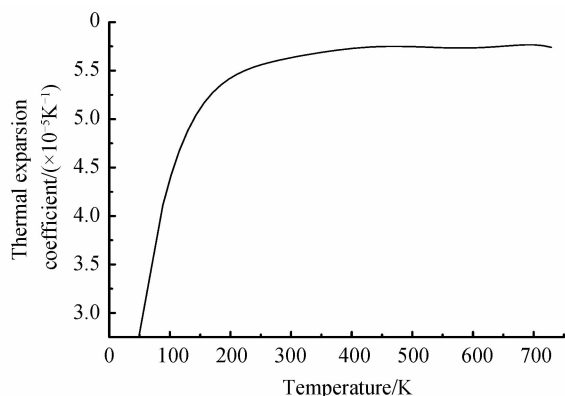


图2 银的热膨胀系数随温度的变化

Fig. 2 The change of silver expansion coefficient depended on temperature

式(4)~(6)描述了金属的介电常量随温度的变化,由于覆盖层和衬底是银,图3给出了银的介电常量实部和虚部随温度的变化曲线<sup>[17]</sup>.在图中可以看出银的介电常量实部和虚部均随温度的升高而增大.

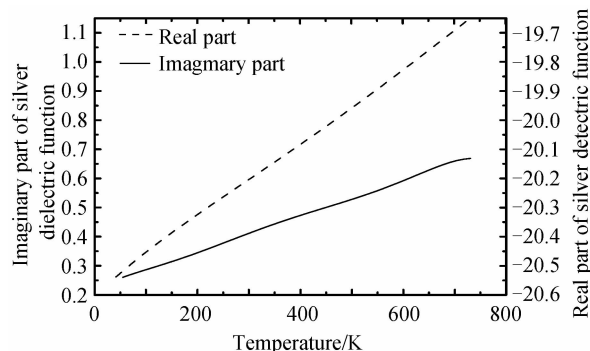


图3 银的介电常量随温度的变化

Fig. 3 The change of silver dielectric constant depended on temperature

根据式(7)可得,纯水折射率随温度变化的曲线,如图4<sup>[17]</sup>.由图4可知,随着温度的升高,纯水折射率下降.这与金属介电常量随温度的变化规律相反.

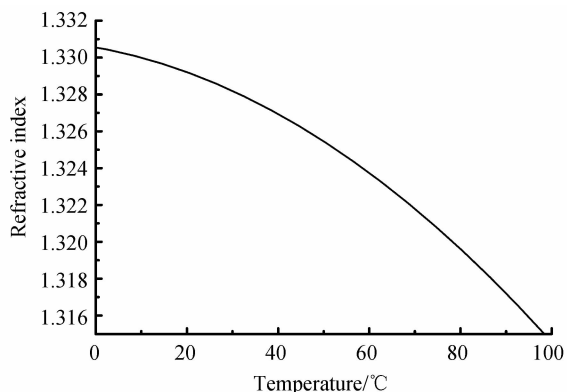


图4 纯水折射率随温度的变化

Fig. 4 The change of pure water refractive index depended on temperature

共振角随温度变化的曲线如图5.由图可知,当温度小于  $27^\circ\text{C}$  时,随着温度的升高,共振角增大;温度大于  $27^\circ\text{C}$  时,随着温度的升高,共振角减小.这是由于纯水的折射率随着温度的增加而减小,与金属介电常量随温度的变化规律相反.纯水折射率的减小会导致共振角的减小,金属介电常量的增加会导致共振角的增加.温度到达  $27^\circ\text{C}$  左右时,金属介电常量对整体的影响与纯水折射率对整体的影响达到饱和.

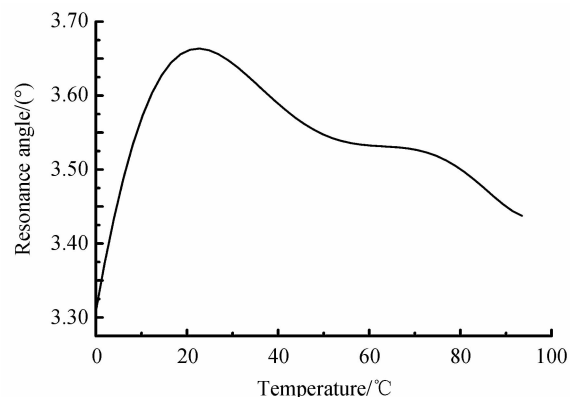


图5 共振角随温度的变化

Fig. 5 The change of resonance angle depended on temperature

在温度的影响下,金属的介电常量和纯水的折射率发生了变化,从而导致 SMCW 衰减全反射吸收峰对应的入射角(共振角)以及吸收峰值也发生了变化.结合金属介电常量和纯水折射率随温度的变化进行模拟,选取导模中的一种模式进行对比,如图6.从图中可以看出,在温度  $T=10^\circ\text{C}$  时,SMCW 在  $\theta=3.569^\circ$  处有最小反射率,其值为 0.239;在温度  $T=40^\circ\text{C}$  时,SMCW 在  $\theta=3.589^\circ$  处有最小反射率,其值为 0.221.在温度  $T=70^\circ\text{C}$  时,SMCW 在  $\theta=3.527^\circ$  处有最小反射率,其值为 0.199.随着温度的升高,共振角先右移再左移,这与图(5)的规律一致,光强的最小反射率降低,共振角处的吸收率升高.介电常量的实部和虚部均会影响吸收峰处的反射率,但相对虚部而言,实部的变化

率很小,故可忽略实部的影响.金属虚部随着温度的增加而增加,所以吸收峰对应的反射率呈现递减规律.

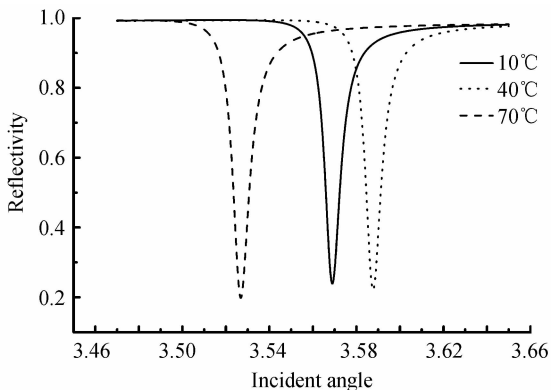


图6 双面金属包覆波导的反射率随温度的变化  
Fig. 6 The change of symmetrical metal-cladding waveguide reflectivity depended on temperature

### 3 结论

通过仿真模拟,分析了 SMCW 性质受温度的影响.在温度的作用下,SMCW 的衰减全反射吸收峰反射率随温度的升高而降低,吸收率提高;共振角随温度的升高出现先增加后减小的现象.当金属介电常量的变化对整体的影响大于纯水时,共振角增加,反之,共振角则减小.研究结果为开发可适应环境温度变化的 SMCW 温度传感器提供了必要的基础.

#### 参考文献

- [1] XIAO Ping-ping, QI Min, HU Hong-wu, *et al.* Wavelength sensing research based on Goos-Hänchen displacement effect [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(10): 1595-1598.  
肖平平, 戚珉, 胡红武, 等. 基于古斯-汉欣位移效应的波长传感研究[J]. *光子学报*, 2011, **40**(10): 1595-1598.
- [2] 曹庄琪. 导波光学[M]. 北京: 科学出版社, 2007: 164-165.
- [3] 冯耀军. 双面金属包覆波导的应用研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2007.
- [4] WANG Xian-ping, YIN Cheng, SUN Jing-jing, *et al.* All-optically tunable Goos-Hänchen shift owing to the microstructure transition of ferrofluid in a symmetrical metal-cladding waveguide[J]. *Applied Physics Letters*, 2013, **103**: 151113.
- [5] 肖平平. 双面金属包覆波导原理及其应用研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2012.
- [6] WANG Yang, HUANG Mei-zhen, GUAN Xing-yu, *et al.* Determination of trace chromium (VI) using a hollow-core metal-cladding optical waveguide sensor[J]. *Optics Express*, 2013, **21**(25): 31130-31137.
- [7] LÜ Hui, MA Xiao-hong, ZHAO Hua-feng. Effect of temperature on surface plasmon resonance sensor[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2009, **36**(6): 146-150.  
吕晖, 马晓红, 赵华风. 温度对表面等离子体振荡传感器的作用[J]. *光电工程*, 2009, **36**(6): 146-150.
- [8] LIN Kai-qun, LU Yong-hua, LUO Yan-hua, *et al.* Temperature characteristic of portable surface plasmon resonance sensor[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(9): 2229-2233.  
林开群, 鲁拥华, 罗艳华, 等. 便携式表面等离子体共振传感器温度特性[J]. *光子学报*, 2009, **38**(9): 2229-2233.
- [9] ZHENG Rong-sheng, LU Yong-hua, LIN kai-qun, *et al.* Recent progress of research on surface plasmon resonance sensors[J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2008, **25**(6): 657-663.  
郑荣升, 鲁拥华, 林开群, 等. 表面等离子体共振传感器研究的新进展[J]. *量子电子学报*, 2008, **25**(6): 657-663.
- [10] CHEN Fan, CAO Zhuang-qi, SHEN Qi-shan, *et al.* Picometer displacement sensing using the ultrahigh-order modes in a submillimeter scale optical waveguide[J]. *Optics Express*, 2005, **13**: 10061-10065.
- [11] CHIANG H P, WANG Y C, LEUNG P T, *et al.* A theoretical model for the temperature-dependent sensitivity of the optical sensor based on Surface Plasmon resonance[J]. *Optics Communication*, 2001, **188**: 183-289.
- [12] SAHIN K Ö, GÖNÜL T S. Temperature effects on surface plasmon resonance: design considerations for an optical temperature sensor[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2008, **3**: 805-814.
- [13] HOLSTEIN T. Optical and infrared volume absorptivity of metal[J]. *Physical Review*, 1954, **96**: 335.
- [14] LAWRENCE W E. Electron-electron scattering in the low-temperature resistivity of the noble metals [J]. *Physical Review B*, 1976, **13**: 5316.
- [15] HASTINGS J T, GUO J, *et al.* Optimal self-referenced sensing using long- and short-range surface plasmons [J]. *Optics Express*, 2007, **15**: 17661-17672.
- [16] 黄昆, 韩汝琦. 固体物理学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1985.
- [17] 林开群. 表面等离子体共振传感的新现象、新方法及其温度特性研究[D]. 合肥: 中国科技大学, 2009.