

文章编号: 0253-2239(2008)07-1333-05

费米折射率波导的包层吸收模谱特性和 溶液浓度传感研究

王海虹¹ 陈抱雪¹ 邹任玲² 矶 守³

(¹ 上海理工大学 光电学院, 上海 200093; ² 上海理工大学 医疗器械学院, 上海 200093)

³ 日本东京农工大学 工学院应用化学系, 日本 184-8588

摘要 采用 0.004AgNO₃-0.996NaNO₃ 混合熔融盐,用离子交换技术在德国 B270 光学玻璃上制备了费米折射率分布渐变波导,理论分析了费米折射率分布渐变波导的包层吸收模谱特性,导波损耗测试实验验证了解析结果。在此基础上,提出了一种用于液体包层吸收损耗测试的双样品盒串连的波导回路,测试结果证实表征溶液包层吸收特征的折射率虚部与溶液浓度之间具有十分显著的线性关系,测试灵敏度与波导的模式和波导参量有关,尤其与波导层厚度有非常敏感的关联性。利用这个关系传感测试了 13 种不同浓度的耐晒果绿染料水溶液样品的浓度,结果显示测试值与实际配制浓度值的均方差小于 0.07%。

关键词 集成光学; 光波导技术; 光波导传感器; 溶液浓度传感; 费米折射率分布

中图分类号 TN25 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20082807.1333

Study on Clad Absorption Spectrum Characteristics and Solution Concentration Sensing using Fermi Refractive Index Waveguides

Wang Haihong¹ Chen Baoxue¹ Zou Renling² Mamoru Iso³

¹ College of Optical and Electronic Information Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China

² Colleges of Medical Instrument, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China

³ Department of Chemical Engineering, Tokyo University of Agriculture and Technology, Tokyo 184-8588, Japan

Abstract Fermi refractive-index distribution gradient waveguides are fabricated on the optical glass B270 using ion exchange process in the composite salt of 0.004AgNO₃-0.996NaNO₃. Absorption spectrum characteristics of the Fermi graded refractive index waveguide with an absorbent clad is theoretically analyzed. The experimental result about propagation loss of the waveguides is coincident with the analytic result. A testing waveguide circuit with a double-sample serial structure for measuring the liquid absorption loss is presented. The measured result shows that there is a remarkable linear relationship between solution concentration and refractive index's imaginary part which represents the feature of solution clad absorption, and the sensitivity is related to the modes and the parameters of waveguide, and particularly to the depth of waveguide. By using this sensing relationship, the concentrations C. I. Pigment Green7 solution samples 13 with kinds of different concentrations have been measured. The standard deviation between the measured values and the actual values is less than 0.07%.

Key words integrated optics; optical waveguide technology; optical waveguide sensor; solution concentration sensing; Fermi refractive-index distribution

收稿日期: 2007-11-15; 收到修改稿日期: 2008-01-08

基金项目: 国家自然科学基金(60677032)、上海市重点学科建设项目(T0501)和上海市教委科技项目(06EZ028)资助课题。

作者简介: 王海虹(1982-),女,硕士研究生,主要从事集成光学、光波导传感等方面的研究。E-mail: whh0223@126.com

导师简介: 陈抱雪(1955-),男,教授,博士生导师,主要从事光电子、集成光学等方面的研究。

E-mail: bxchen@online.sh.cn

1 引 言

近年来在医学、生物化学量测试方面,以导波光为载体,测定液态样品中特定成分浓度的研究有很多报道^[1~5]。结构光纤和波导两类,光纤型易得较长的作用距离,由累积效应提高灵敏度^[6]。波导型多以待测样品为包层,样品浓度变动引起包层吸收系数和折射率的变动,吸收系数影响传输损耗,折射率影响导模的场分布和相位。因此传感机制涉及波导色散和光波倏逝场与样品的相互作用。由于倏逝场被限制在极其靠近界面处,些许液体即可提供数十毫米的作用长度,易实现微量采样测试。使用均匀折射率波导的传感实验已有报道^[7],我们试验了蛋白质浓度的测定^[8],理论和实验都表明,测试灵敏度不仅与作用长度有关,还与模式和波导参量有关,尤其对波导厚度敏感,亚微米级的变化就可引起灵敏度的明显变动。均匀折射率波导一般采用磁控溅射制备,受靶尺

寸等工艺条件的限制,厚度均匀性约有数个光圈,与亚微米量级相当,直接影响灵敏度控制。为解决此问题,改用混合熔盐离子交换工艺制备波导^[9,10],有两个好处,一是工艺条件十分稳定,可以得到大面积均匀薄膜;另一个是合适的熔盐配方可以改善基板表面应力,得到界面光滑、传输损耗很小的波导^[11]。实验采用 $\text{AgNO}_3 - \text{NaNO}_3$ 混合盐,基板是德国 B270 光学玻璃,用循环迭代法^[12,13]测得波导折射率具有费米分布的渐变特征,比较均匀波导,对传感机制的把握以及结构优化设计都变得十分复杂。本文围绕这方面展开,内容包括理论和特性分析、工艺和折射率测定、以及实验和结果。

2 包层吸收模谱的特性解析

带有吸收介质包层的费米渐变波导的折射率分布可表示成^[7, 13]

$$\begin{aligned} n_c &= n_{cr} - jn_{ci} && \text{clad}(x < 0) \\ n(x) &= n_s + \Delta n \left[1 - \exp\left(-\frac{d}{a}\right) + \exp\left(\frac{x-d}{a}\right) \right]^{-1}, && \text{substrate}(x \geq 0) \end{aligned} \quad (1)$$

式中 n_{cr} 和 n_{ci} 分别为包层折射率的实部和虚部, n_s 为基板折射率, Δn 为基板表面折射率增量, a 和 d 为与渐变波导的变化率及有效厚度等有关的参量。由 WKB 方法得到导模本征方程

$$\int_0^{x_m} \sqrt{k_0^2 n^2(x) - \beta^2} dx = \left(m + \frac{1}{4}\right)\pi + \arctan\left\{ \eta \frac{\sqrt{\beta^2 - k_0^2 n_c^2}}{\sqrt{k_0^2 n^2(0) - \beta^2}} + \frac{k_0^2 n(0) [dn(x)/dx]|_{x=0}}{2[\sqrt{k_0^2 n^2(0) - \beta^2}]^3} - \xi \right\}, \quad (2)$$

$$m = 0, 1, 2, \dots$$

$$\begin{aligned} \eta &= 1, & \xi &= 0, & \text{TE mode} \\ \eta &= \frac{n^2(0)}{n_c^2}, & \xi &= \frac{dn(x)/dx|_{x=0}}{n(0) \sqrt{k_0^2 n^2(0) - \beta^2}}, & \text{TM mode} \end{aligned}$$

式中 k_0 是波数,导模传播常数 β 包含实部 β_r 和虚部 β_i , 记为

$$\beta = \beta_r - j\beta_i, \quad (3)$$

x_m 是由 $\beta_r = k_0 n(x_m)$ 决定的转移点。令(2)式等号两边实部和虚部分别相等,可以求得传播常数的实部和虚部。依据式(1)和式(3),包层对光波的吸收系数 α_c 以及由此引起的波导对导模的吸收系数 α_w 可以写成

$$\alpha_c = 2k_0 n_{ci}, \quad \alpha_w = 2\beta_i, \quad (4)$$

用相互作用比 R 表征导模损耗与介质包层吸收之间的相关程度,定义为^[7]

$$R = \frac{\alpha_w}{\alpha_c} = \frac{\beta_i}{k_0 n_{ci}}, \quad (5)$$

R 通过 β_i 与波导参量关联,其大小直接反映波导结构传感包层吸收的敏感程度。费米折射率分布平面

波导 R 特性的数值结果如图 1,取 $n_{ci} = 0.000051$, 横坐标是由下式定义的归一化波导扩散深度 V_d

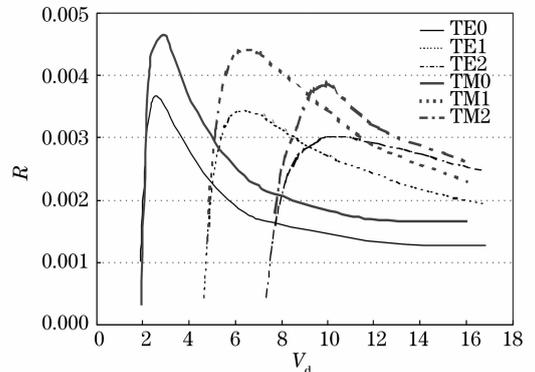


图 1 费米折射率分布波导包层吸收模谱特征

Fig. 1 Clad absorption spectrum characteristic of Fermi refractive index distribution waveguide

$$V_d = k_0 d_e \sqrt{n^2(0) - n_s^2}, \tag{6}$$

式中 d_e 是等效扩散深度,由

$$n(d_e) = n_s + \Delta n/e \tag{7}$$

解得。图 1 显示,相互作用比 R 与导模阶数和归一化扩散深度有很强的相关性, TM 模的传感灵敏度比 TE 模的大,这是费米折射率分布波导包层吸收模谱的基本特征。出现这种特征的原因与导模模场在波导结构中的约束程度有关,导波光学指出的一般规律是,在同一扩散深度下,高阶模的约束程度比低阶模的低, TM 模的约束程度比同阶号的 TE 模的低。低约束程度的导模意味着其包层倏逝场的渗出深度比较大,光波与包层介质的相互作用增强,传感灵敏度因此增大。另一个涉及导模场分布的基本规律是,导模的模场约束程度与扩散深度成正比,处于扩散深度较小的波导中的导模的包层倏逝场的渗出深度比处于扩散深度较大的波导中的导模的大,因此传感灵敏度较大。然而过分减小波导的扩散深度会使导模截止,此时如图 1 所示,传感灵敏度骤然下降。

3 实验验证

基板采用德国 B270 光学玻璃($n_s = 1.5211, \lambda = 632.8\text{nm}$),离子源是 $0.004\text{AgNO}_3\text{-}0.996\text{NaNO}_3$,恒温温度是 $350\text{ }^\circ\text{C}$,在 $15\sim 60\text{ min}$ 之间改变交换时间,制备了 10 片折射率渐变波导,单片波导的模数从 2 个到 5 个不等,合计模数 35 个。用棱镜耦合技术激励 TM 模,测定了各模的传播常数,在此基础上采用统计优化循环迭代法^[12]做了拟合,结果显示波导折射率分布具有费米函数特征,涉及各片波导的折射率分布的具体参量如表 1,35 个模式的传播常数实测值与拟合值的均方差小于 0.00019。试验

用包层样品是耐晒果绿染料水溶液,浓度为 0.99%。用折射率和比色计测得包层样品在 632.8 nm 波长下的折射率为 $n_{cr} = 1.4466, n_{ci} = 0.000024$,结合表 1 的数据得到的样品波导包层吸收模谱的特征曲线示于图 2,每个模式都有各自的传感灵敏度峰值,在相同的归一化波导扩散深度 V_d 下, TM 模的传感灵敏度比 TE 模的高。

表 1 实验样品及其费米折射率分布参量

Table 1 Fermi refractive index distribution parameters of experimental sample

No.	Exchange time / min	Number of modes	Δn	a	$d / \mu\text{m}$
1	15	2	0.0373	0.3224	0.8298
2	20	3	0.0436	0.4082	1.9720
3	25	3	0.0439	0.4857	2.1446
4	30	3	0.0447	0.5224	2.2628
5	35	3	0.0452	0.5857	2.4482
6	40	4	0.0464	0.6224	2.5384
7	45	4	0.0474	0.6633	2.6187
8	50	4	0.0475	0.7107	2.8515
9	55	4	0.0477	0.8347	2.9415
10	60	5	0.0481	0.8837	3.1920

验证实验采用图 3 的光学系统,样品盒直接在波导表面上制备,盖板玻璃与波导表面之间填入直径为 $20\text{ }\mu\text{m}$ 的石英球粒,耐晒果绿染料水溶液用毛细管效应注入,样品盒沿光传输方向的长度为 4 mm 。 632.8 nm 激光经输入棱镜耦合选择性激励

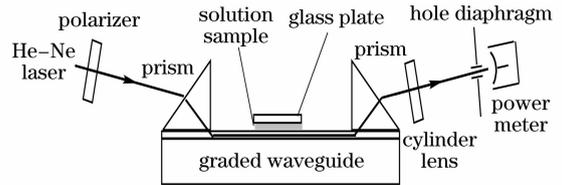


图 3 实验结构

Fig. 3 Experimental set up

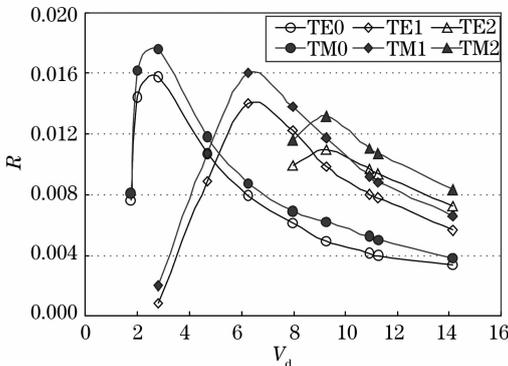


图 2 样品波导包层吸收模谱特征

Fig. 2 Clad absorption spectrum characteristic of sample waveguides

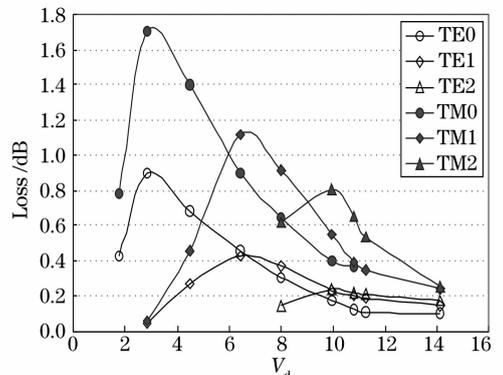


图 4 波导包层吸收损耗实测值

Fig. 4 Measured values of waveguide clad absorption loss

导波光,经样品包层吸收后由输出棱镜耦合出射,出射光经柱透镜汇聚后送往光功率计。样品溶液注入前后的实测功率差作为包层吸收引起的损耗,若干样品的测试结果汇总于图 4,波导包层吸收模谱表现出与图 2 相同的特征。

4 溶液浓度测试实验

实验系统如图 5 所示,选用 $R(\text{TM}_0)=0.0176$ 的费米折射率分布波导,632.8 nm 激光经偏振片后激励 TM_0 模,输入棱镜和波导表面之间注有待测液体样品,通过测定同步角得到传播常数 β_r 。两个样品盒有相同的长度 $L=4$ mm。该结构的优点在于可通过分步测试的方法消除包括波导自身损耗、棱镜耦合损耗和系统其它额外损耗在内的本底损耗的影响,测试分两步,第一步在第 1 个样品盒注入待测液体后测得输出功率 $P_{\text{out}1}$,第二步在两个样品盒均注入待测液体后测得输出功率 $P_{\text{out}2}$ 。由于液体注入采用在样品盒边缘处微量滴液后经毛细管效应吸附来实现,操作过程几乎不摄动包括棱镜耦合结构在内的光路系统,涉及输出和输入的耦合效率维持不变,因此本底损耗在求解 β_r 时被抵消。于是由下式解得 β_r :

$$2\beta_r = \frac{\ln P_{\text{out}1} - \ln P_{\text{out}2}}{L}, \quad (8)$$

测得 β_r 和 β_c 后,代入(2)式得到液体样品的 n_c 和 n_a 。实验在 0.2%~2%之间配制了 13 种不同浓度的耐晒果绿染料水溶液,图 6 给出了测得的 n_{ci} 与样品浓度的相关关系,相关系数 $R=0.996$,高于临界值 0.684,显示出十分显著的线性相关性。液体样品的吸收系数 α_c 与 n_{ci} 有如下关系:

$$\alpha_c = 2k_0 n_{ci}, \quad (9)$$

由此得到液体样品的浓度 C :

$$C = \alpha_c / \alpha_0, \quad (10)$$

式中 α_0 是液体样品的固有吸光系数。采用比色计预先测得耐晒果绿染料水溶液在 632.8 nm 波长下的 α_0 为 $0.055 \mu\text{m}^{-1}$,利用图 6 的结果传感测得浓度范围在 0.2%~2%之间的 13 种样品的浓度值,

误差分析表明与实际配制浓度值的均方差小于 0.07%。该结果表明上述传感结构及其测试方法可以实现液体样品浓度的高精度测定,关键技术主要有两个,一是采用低浓度银离子混合盐制备离子交换波导,这种技术具有较低的离子交换速率,从而可以保证波导扩散深度的大面积均匀性和良好的表面品质;另一个是采用可实现毛细管效应的双样品盒串连结构,这种结构提供了通过分步测试消除系统本底损耗影响的可能。

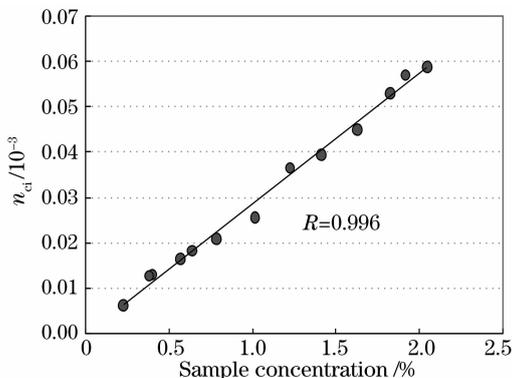


图 6 n_{ci} 与样品浓度的相关关系

Fig. 6 Correlation between n_{ci} and sample concentration

5 结 论

采用 0.004AgNO₃-0.996NaNO₃ 混合盐在德国 B270 光学玻璃上制备了费米折射率分布渐变波导,理论分析和实验测试了该类渐变波导的包层吸收模谱特性。采用具有双样品盒串连结构的液体包层波导,测试了包层吸收损耗,结果表明表征溶液包层吸收特征的折射率虚部与溶液浓度之间具有十分显著的线性相关性。利用这个特性传感测试了 13 种不同浓度的耐晒果绿染料水溶液样品,浓度测试值与实际配制浓度值的均方差小于 0.07%。

参 考 文 献

- 1 Y. Abliz, K. Itoh, M. Murabayashi. Detection of ammonia in the ppt range based on a composite optical waveguide pH sensor [J]. *Sens. Actuators B*, 2003, **88**(3): 239~245
- 2 David A. Chang-Yen, Bruce K. Gale. An integrated optical sensor fabricated using PDMS waveguides on a PDMS substrate [C]. *Proc. SPIE*, 2004, **5345**: 98~107
- 3 J. Buerck, S. Roth, K. Kraemer *et al.*. Application of a fiber-optic NIR-EFA sensor system for in situ monitoring of aromatic hydrocarbons in contaminated ground water [J]. *J. Hazard. Mater.*, 2001, **83**(1~2): 11~28
- 4 T. Umemura, Y. Kasuya, T. Odake *et al.*. Sensitive measurement of methylene blue active substances by attenuated total reflection spectrometry with a trimethyl-silane-modified glass slab optical waveguide [J]. *Analyst*, 2002, **127**(1): 149~152

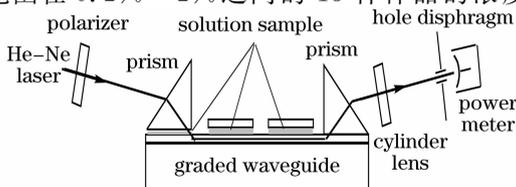


图 5 液体浓度传感实验结构

Fig. 5 Experimental setup of solution concentration sensing

- 5 M. D. Foster, R. E. Synovec. Liquid chromatographic sensing in water on a thin-clad optical fiber by mode filtered light detection[J]. *Anal. Chim.*, 1996, **68**(8): 1456~1463
- 6 H. Horry. Technological conception of an optical biosensor with a disposable card for use with bioluminescent bacteria[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2007, **122**(2): 527~534
- 7 姜信元, 南谷晴之, 佐佐木敬. 薄膜光导波路を用いた生体化学量センサ[J]. 計測自動制御学会論文集, 1993, **29**(8): 906~915
- 8 Zou Renling, Chen Baoxue, Wang Haihong *et al.*. Glucose sensor based on planar optical waveguides [J]. *IEEE Proc. iCBBE*, 2007, **2**: 1085~1087
- 9 Han Xiuyou, Pang Fufei, Cai Haiwen *et al.*. Optical waveguide ring resonator filter by using ion-exchanged glass[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(7): 1053~1056
韩秀友, 庞拂飞, 蔡海文等. 一种离子交换制备的玻璃光波导谐振腔滤波器[J]. 光学学报, 2006, **26**(7): 1053~1056
- 10 Zhang Yali, Zhang Tao, Zhu Ninghua *et al.*. Variational analysis of buried ion-exchanged optical waveguide by using Hermite-Gaussian field approximations[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(6): 981~986
张雅丽, 张 韬, 祝宁华等. 掩埋型离子交换玻璃光波导的变分分析[J]. 光学学报, 2007, **27**(6): 981~986
- 11 A. Brandenburg. Stress in ion-exchanged glass waveguides[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1986, **LT-4**: 1580~1593
- 12 B. X. Chen, H. Hamanaka, K. Iwamura. Recovery of refractive-index profiles of planar graded-index waveguides from measured mode indices: an iteration method[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1992, **9**(8): 1301~1305
- 13 Liang Dongbo, Tang Jie Iso M *et al.*. Recovery of refractive-index profiles of proton-exchanged waveguides using statistical optimum iteration method[J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(6): 670~673
梁东波, 唐 杰, 矶 守等. 统计优化迭代法测量质子交换波导折射率分布[J]. 光学学报, 2002, **22**(6): 670~673

《激光与光电子学进展》“光学设计”专题征稿启事

《激光与光电子学进展》是中科院上海光机所主办的的科技进展类期刊, 中文核心期刊, 创刊于 1964 年, 是国内第一本激光领域的专业期刊。本刊以及时报道国内外激光与光电子学领域科技的最新研究成果与技术应用为宗旨, 促进国内外学术交流, 沟通科研与产业的联系。

光学设计是光学产业的高级技术之一, 在光电、半导体、汽车等行业中起着重要的作用。为了深入研讨光学设计技术, 探索光学设计最新理念、成功案例, 《激光与光电子学进展》将于 2008 年 12 期推出“光学设计”专刊, 现向光学设计研发、应用人员公开征稿, 具体要求如下:

1. 来稿可以为综述、研究论文和实例分析, 综述要求内容全面, 能反映最新研究进展; 研究论文要求具有创新性; 实例分析要求应用性强, 分析深入, 有一定的代表性;

2. 综述要求第一作者有丰富的光学设计经验, 在某一方面有较深入的研究或者能够纵观全局, 字数不限;

3. 研究论文和实例分析字数在 5000~10000, 优秀文章更可获得光学设计专家的点评和指导;

4. 本次专题征稿截止时间为 2008 年 10 月 15 日, 可在本刊主页投稿或通过信箱投稿 lop@siom.ac.cn, 如有问题欢迎垂询(021-69918166);

5. 本次专题征稿审稿通过, 在本刊发表不收取版面费; 本期光学设计专刊, 同期报道上海光机所第 5 届光学设计高级讲习班、光学设计大赛, 欢迎投稿, 敬请关注。

《激光与光电子学进展》编辑部

2008-06-23